

STAT

Page Denied

TECHNISCHE-PHYSIKALISCHE
MONOGRAPHIEN

VAND 1

P. GÖRLICH

DIE PHOTOZELLEN

AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT
GEEST & PORTIG K.-G., LEIPZIG

TECHNISCH-PHYSIKALISCHE MONOGRAPHIEN

HERAUSGEgeben VON

DR. PHIL. HABIL. RUDOLF SEWIG

A. P. PROFESSOR AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE BRAUNSCHWEIG

BAND 4

DIE LICHTELEKTRISCHEN ZELLEN

IHRE HERSTELLUNG UND
EIGENSCHAFTEN

von

DR.-ING. HABIL. PAUL GÖRLICH

MIT 115 ABBILDUNGEN



LEIPZIG 1951

AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT
GEEST & PORTIG K.G.



LEIPZIG 1951

AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT
GEEST & PORTIG K.G.

Vorwort

Über die lichtelektrischen Effekte liegt, entsprechend ihrer Bedeutung, sowohl in wissenschaftlicher als auch in technischer Hinsicht bereits eine Mehrzahl zusammenfassender Werke vor. Teils richten sie sich jedoch nur an den Wissenschaftler, teils nur an den Techniker, und teils wird in ihnen lediglich eine Art der lichtelektrischen Zellen behandelt. Der vorliegende Band soll nun demjenigen, der sich über das gesamte Gebiet der lichtelektrischen Effekte orientieren will, einen Überblick ermöglichen, und weil diesen Band in erster Linie der Techniker in die Hand nehmen wird, ist auch in der Auswahl des Stoffes auf ihn Rücksicht genommen worden. Sollte er jedoch an dieser oder jener Stelle mehr zu wissen wünschen, so wird ihm die angegebene Literatur im allgemeinen den richtigen Weg weisen. Der Verfasser hat sich bemüht, den neuesten Stand wiederzugeben. Also sind Photozellenvervielfacher und die Lichtzähler in die Betrachtungen eingeschlossen worden. Dafür mußten viele Einzelheiten, beispielsweise die Eigenschaften der Alkalihydridzellen oder die Beschreibung der zahlreichen Versuchsergebnisse an Kupferoxydulsperrschichtzellen, zurücktreten. Vom Verfasser wurde dies nicht als Nachteil angesehen, weil auch über die in diesem Band vernachlässigten Einzelheiten in den erwähnten zusammenfassenden Werken zum Teil ausgezeichnete Darstellungen zu finden sind. An Einzelliteratur konnte wegen der großen Fülle nicht alles herangezogen werden. Die Auswahl soll keinerlei Werturteil ausdrücken. Auf die ältere Literatur wurde von vornherein verzichtet, weil diese in anderen Werken, z.B. im GUDDEN, „Lichtelektrische Erscheinungen“ bis 1928, bereits vollständig erfaßt ist. Als notwendig erachtete es der Verfasser, die Abschnitte III und V über die verwandten Emissionserscheinungen, Glüh-, Sekundär- und Feldemission, einzufügen, weil die neuzeitliche Photozellentechnik auch diese Emissionsarten benutzt (vgl. z.B. den Vervielfacher).



Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Copyright 1951 by Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig
Printed in Germany
Satz und Druck: Wilhelm Hoppe in Borsdorf · Lizenz-Nr. 104, 2168/48-4382/47

Für den Hinweis, dieses Buch zu schreiben, ist der Verfasser Herrn Prof. Dr. SEWIG zu Dank verpflichtet, ebenso dafür, daß Herr Prof. SEWIG durch großes Verständnis das Entstehen des Bandes jederzeit förderte. Dank sagen muß der Verfasser auch Herrn Ing. W. LANG, der als langjähriger Mitarbeiter des Verfassers in uneignungsvoller Weise die Korrekturen las, und nicht zuletzt der Akademischen Verlagsgesellschaft, die alle Wünsche des Verfassers zu berücksichtigen verstand und den Verfasser vorbildlich unterstützte.

Der Verfasser schätzt sich dann besonders glücklich, wenn der Leser nicht nur für seine Arbeit Nutzen aus dem Buche zieht, sondern darüber hinaus auch besondere Freude an dem dargebotenen Gebiet gewinnt.

P. Görlich.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	Seite
	V
Abschnitt I. Der lichtelektrische Ablöseakt und die lichtelektrischen Effekte	
§ 1. Die zeitabhängige SCHRÖDINGER-Gleichung und ihre Eigenwerte	1
§ 2. Abgrenzung der lichtelektrischen Effekte	2
Abschnitt II. Gesetzmäßigkeiten	
§ 1. Allgemeine Betrachtungen	4
§ 2. Begriff der Austrittsarbeit	4
§ 3. Die Grundlagen des äußeren lichtelektrischen Effektes	15
§ 4. Die Grundlagen des inneren lichtelektrischen Effektes	18
§ 5. Die Grundlagen des Sperrsichtphotoeffektes	22
§ 6. Die Grundlagen des Feldemissionen	27
Abschnitt III. Verwandte Emissionserscheinungen	
§ 1. Glühelektrische Emission	32
§ 2. Sekundäremission	32
§ 3. Feldemission	34
§ 4. Die Grundlagen des Feldemissionen	36
Abschnitt IV. Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektrischen Effekt	
§ 1. Spektrale Verteilung und langwellige Grenze	38
§ 2. Reine Metalle als Kathodenmaterial	41
§ 3. Dünne Schichten auf Metallunterlage als Kathoden	54
§ 4. Zusammengesetzte Kathoden	57
Abschnitt V. Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden und Kathoden für die Glüh-, Sekundär- und Feldemission	
§ 1. Glühemission	81
§ 2. Sekundäremission	81
§ 3. Feldemission	88
§ 4. Die Grundlagen des Feldemissionen	94
Abschnitt VI. Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem inneren lichtelektrischen Effekt	
§ 1. Alkalihalogenide	97
§ 2. Kupferoxydul	97
§ 3. Selen	102
§ 4. Selen-Tellur	105
§ 5. Thalliumsulfid	107
	109

VIII

Inhaltsverzeichnis

	Seite
§ 6. Bleisulfid und andere Substanzen zur Herstellung technischer Widerstandszellen	110
Abschnitt VII. Aufbau und Herstellung von Sperrsichtzellen	118
§ 1. Kupferoxydul	118
§ 2. Selen	121
§ 3. Thalliumsulfid	126
§ 4. Silbersulfid	128
§ 5. Bleisulfid	129
§ 6. Phosphore als Halbleitersicht	130
Abschnitt VIII. Zellen aus natürlichen u. künstlichen Kristallen	131
§ 1. Lichtdetektoren aus natürlichen Kristallen	131
§ 2. Bleiglanznetzellen aus natürlichen Kristallen	135
§ 3. Zellen aus künstlichen Kristallen	137
Abschnitt IX. Technische Ausführungsformen	139
§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt (Alkalizellen)	139
§ 2. Vervielfacher	157
§ 3. Zellen mit innerem lichtelektrischen Effekt (Widerstandszellen)	172
§ 4. Sperrsichtzellen (Photoelemente)	178
Abschnitt X. Eigenschaften der lichtelektrischen Zellen	181
§ 1. Kennlinien	181
§ 2. Konstanz bzw. Inkonstanz und Lebensdauer	204
§ 3. Temperaturabhängigkeit	214
§ 4. Frequenzabhängigkeit	220
§ 5. Nachweisgrenze	228
§ 6. Zusammenfassung der wichtigsten Zellendaten	237
Abschnitt XI. Lichtzähler	238
Abschnitt XII. Anhang	245
§ 1. Geschichtliche Angaben über die lichtelektrischen Effekte	245
Ergänzungen zu den Tabellen 16, 18, 19, 20	248
§ 2. Übersichtstafeln	249
§ 3. Zusammenfassende Literatur über die lichtelektrischen Effekte und ihre Grenzgebiete	250
§ 4. Einzelliteratur	252
§ 5. Ergänzungen (nach dem Umbruch)	264
Verzeichnis der Tabellen	272
Namenverzeichnis	273
Sachverzeichnis	281

I. Abschnitt

Der lichtelektrische Ablöseakt und die lichtelektrischen Effekte

§ 1. Die zeitabhängige SCHRÖDINGER-Gleichung und ihre Eigenwerte

In der wellenmechanischen Theorie kann mit der zeitabhängigen SCHRÖDINGER-Gleichung¹⁾

$$\Delta Y - \frac{4\pi im}{h} \frac{\partial Y}{\partial t} - \frac{8\pi^2 m}{h^2} EY = 0 \quad (1)$$

sowohl das Dispersionsproblem als auch das Problem der lichtelektrischen Ablösung von Elektronen beschrieben werden. Die in der Gleichung (1) auftretende komplexe Größe Y multipliziert mit der zu ihr konjugierten Größe Y^* läßt sich als elektrische Ladungsdichte deuten, h ist das PLANCKSche Wirkungsquantum und m die Masse des Materienteilchens. Die Energie E setzt sich aus zwei Gliedern zusammen, einmal aus der potentiellen Energie des ungestörten Atoms und zum anderen aus einem Betrag, der durch das wechselnde elektrische Feld (als solches kann die ankommende Lichtwelle angesprochen werden) gegeben ist. Bezogen auf ein Atom ergeben sich, wie aus der Theorie der Differentialgleichungen bekannt ist, zwei Gruppen von Eigenwerten der SCHRÖDINGERSchen Differentialgleichung, einmal die diskontinuierlichen oder diskreten Eigenwerte, zum anderen die kontinuierlichen, so daß von einem diskreten und einem kontinuierlichen Spektrum der Energie gesprochen werden kann. Der Einfluß einer Lichtwelle auf ein Atom zeigt sich nun darin, daß je nach der Frequenz der einfallenden Welle entweder diskrete Eigenwerte, denen periodische Elektronenbewegungen im Atom entsprechen, auftreten (Dispersion) oder aber kontinuierliche. Im letzten Falle wird das Elektron vom Atom entfernt. Den kontinuierlichen Eigenwerten entsprechen aperiodische Elektronenbewegungen. Man spricht von einem lichtelektrischen Effekt²⁾. Die primär einfallende Energie $h\nu$ muß dabei

Görlich, Die lichtelektrischen Zellen

2 Der lichtelektrische Ablöseakt und die lichtelektrischen Effekte

größer als die Ionisationsenergie des Atoms sein. Durch die Ionisationsenergie werden in einfachen Fällen, wie etwa für das Wasserstoffatom, die beiden Bereiche der Eigenwerte getrennt.

§ 2. Abgrenzung der lichtelektrischen Effekte

In den meisten, insbesondere in den technisch interessierenden Fällen findet der Ablöseakt nicht an einem Einzelatom statt, sondern an einem Atom, welches als Baustein einem Körper im festen oder flüssigen Aggregatzustand eingefügt ist. Das lichtelektrisch abgelöste Elektron folgt daher den Bedingungen, die es in dem bestrahlten Körper vorfindet. Besitzt das Elektron z. B. eine so große Energie, daß es die an der Grenze Körper-Vakuum auftretende Potentialsschwelle überwinden kann, so tritt das Elektron aus dem Körper aus (äußerer lichtelektrischer Effekt). Reicht hingegen die Energie des Elektrons zum Austritt nicht hin, so kann es dem bestrahlten Körper als Leitungselektron dienen. Es wird der Messung dadurch zugänglich gemacht, daß es in einem angelegten elektrischen Feld der Richtung dieses Feldes folgt (innerer lichtelektrischer Effekt). Der innere lichtelektrische Effekt tritt vornehmlich an Halbleitern und Isolatoren auf. Neben dem inneren lichtelektrischen Effekt an Halbleitern wird an einer Halbleiter-Metallkombination mit unipolarer Leitfähigkeit der Sperrschichtphotoeffekt beobachtet. Das abgelöste Elektron überwindet einen zwischen lichtempfindlichem Halbleiter und Metall-Elektrode befindlichen Potentialberg und gelangt über den äußeren Stromkreis wieder zur Halbleiterschicht zurück. Für eine Sperrschichtzelle ist häufig auch die Bezeichnung Photoelement in den Gebrauch gekommen, weil bei Belichtung einer Sperrschichtkombination eine selbständige EMK auftritt. Auch Vielkristalle mit Halbleitereigenschaften oder die Grenzfläche Elektrode-Elektrolyt (BECQUEREL-Effekt) können im belichteten Zustand eine selbständige EMK geben. Schließlich ist an einer Anzahl natürlich vorkommender Cupriteinkristalle das Auftreten einer Photo-EMK festgestellt worden, deren Richtung von der Richtung des die Elektronen ablösenden Lichtes abhängig ist (Kristallphotoeffekt).

§ 2. Abgrenzung der lichtelektrischen Effekte

3

In den weiteren Betrachtungen werden die lichtelektrischen Effekte, deren technische Ausführungen auf die Dauer nicht befriedigten oder die bisher überhaupt zu keiner technischen Anwendung führten, nur so weit berücksichtigt, als sie zum besseren Verständnis der lichtelektrischen Vorgänge dienen können. Es scheiden daher für eine breitere Betrachtung im folgenden der BECQUEREL-Effekt³⁾ und der Kristallphotoeffekt⁴⁾ aus.

1*

II. Abschnitt

Gesetzmäßigkeiten

§ 1. Allgemeine Betrachtungen^{b)}

Der lichtelektrische Ablöseakt, wie er sich auf Grund wellenmechanischer Anschauungen darstellen läßt (vgl. I, § 1), wird in reiner Form bei der Betrachtung des lichtelektrischen Effektes an Gasen und Dämpfen vorliegen. Erst in festen Körpern tritt die Vielzahl der lichtelektrischen Erscheinungen (äußerer und innerer lichtelektrischer Effekt, Sperrsichtphotoeffekt u. a.) zutage. Den weiteren Betrachtungen muß daher ein kurzer Überblick über die Anschauungen vorangehen, die man sich vom festen Körper gebildet hat. Es muß ferner das Verhalten einer Summe von Elektronen und die Einwirkung einer Anzahl von Lichtquanten auf diese Elektronen untersucht werden, denn die lichtelektrische Wirkung wird, abgesehen vom Lichtquantenzähler, stets von einer größeren Zahl einfallender Lichtquanten hervorgerufen.

Tab. 1. Aufbau der Elektronenhülle

Ordnungs- zahl	Element	Zahl der Elektronen für das Energieniveau									
		K-Schale		L-Schale		M-Schale		N-Schale			
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f
1	H	1									
2	He	2									
3	Li	2	1								
4	Be	2	2								
5	B	2	2	1							
11	Na	2	2	6	1						
12	Mg	2	2	6	2						
13	Al	2	2	6	2	1					
19	K	2	2	6	2	6		1			
20	Ca	2	2	6	2	6		2			

§ 1. Allgemeine Betrachtungen

5

a) Aufbau des Atoms

Das PAULI-Prinzip fordert, daß jedes Elektronenniveau im Atomverband wegen der Spinquantenzahl, die nur $+1/2$ oder $-1/2$ betragen kann, zweifach besetzt ist. Zwei Elektronen müssen sich daher, wenn die Quantenzahlen, die die Bahn festlegen, übereinstimmen, wenigstens durch die Spinquantenzahl unterscheiden. Aus der Tabelle 1 kann für einige Elemente der Aufbau der Elektronenhülle, d. h. die Besetzung der Elektronenniveaus, entnommen werden.

Bildlich läßt sich das Energieschema eines freien Atoms, wie in Abb. 1 gezeigt, darstellen. Das Potential in der Nähe des Atomkernes verläuft trichterförmig, die unteren Schalen (im Beispiel die K- und L-Schalen) sind voll besetzt, während die mit s, p und d bezeichneten folgenden Schalen, da sie die Valenzelektronen enthält, nur eine teilweise Besetzung aufweist (vgl. Tabelle 1). Bei allen einwertigen Metallen ist das s-Niveau einfach, bei allen zweiwertigen jedoch doppelt besetzt. Beim dreiwertigen Metall beginnt der Aufbau des p-Niveaus.

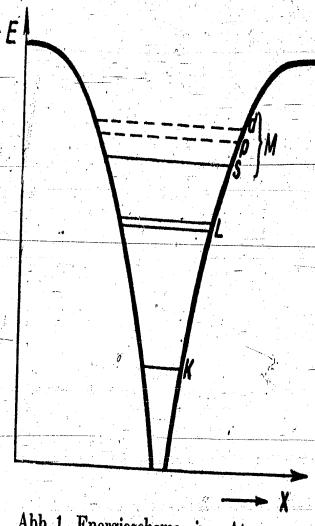


Abb. 1. Energieschema eines Atoms.

b) Entstehung der Energiebänder

Tritt eine Summe von Atomen zu einem festen Körper zusammen, so ergibt sich schematisch ein Potentialverlauf, wie er in Abb. 2 dargestellt ist. Das PAULI-Prinzip behält auch hier seine Gültigkeit, d. h. es ist nicht möglich, daß sämtliche Elektronen eines Energieniveaus der n Atome im Gitter nur dieses Energieniveau besetzen.

Die quantenmechanischen Austauschkräfte, die bei genügend großer Annäherung der Atome wirksam werden, bewirken vielmehr eine Aufspaltung der scharfen Energieniveaus in Energiebänder. Ein solches

Energieband besteht daher, wenn n Atome zusammentreten, aus n dicht aneinanderliegenden Energieniveaus, wovon jedes im Grundzustand so viel Elektronen enthalten kann, wie es die aus der Tabelle 1 zu entnehmende Besetzungsmöglichkeit des entsprechenden Niveaus zuläßt. Für die kernnahen Elektronen, z. B. für die Elektronen der K-Schale, sind die Energiebänder noch sehr schmal, d. h. die Gitter-

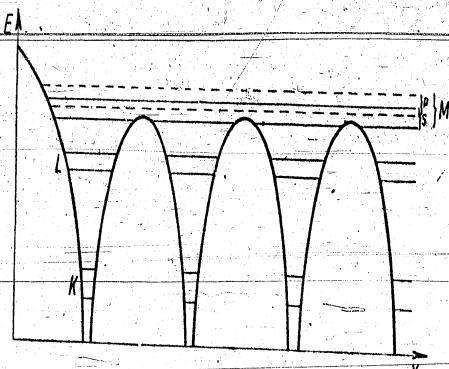


Abb. 2. Energieschema eines festen Körpers.

atome verhalten sich diesen Elektronen gegenüber etwa wie Einzelatome. Die quantenmechanischen Austauschvorgänge zwischen den benachbarten Atomen verlaufen außerordentlich langsam, etwa in der Größenordnung von einigen Tagen. Dieser Befund kann aus den entsprechenden Röntgenspektren geschlossen werden, die sich als unabhängig vom Bindungszustand erweisen, und außerdem aus der Scharfe der den inneren Elektronen zugehörigen optischen Übergängen. Für die äußeren Elektronen gilt, daß für größer werdende Elektronenenergien die Energiebänder immer breiter werden, hingegen die dazwischenliegenden verbotenen Zonen immer schmäler. Die Materiewellenlängen von Elektronen verbreiterter Energie nähern sich, je größer die Elektronenenergie wird, immer mehr den Wellenlängen, die die BRAGGSchen Reflexionsbedingungen des Kristalls erfüllen. Eine Bestätigung der theoretischen Überlegungen ist in den Ergebnissen zu sehen, die durch das Studium der Feinstruktur der Röntgenabsorptionskanten an Metallen und Ionenkristallen sowie durch die Kenntnis der Absorptionsverhältnisse photochemisch verfärbter Alkalihalogenide gewonnen worden sind.

Zunächst ist nun die bemerkenswerte Tatsache festzustellen, daß die Austrittsenergie für die Elektronen des festen Körpers einen geringeren Wert besitzt als die Ionisationsenergie des Atoms im freien Zustand. Außerdem tritt zwischen den einzelnen Atomen des Gitters eine Senkung des Potentialberges ein, und zwar um einen Betrag, der noch größer als die Herabsetzung der Austrittsenergie ist, so daß für bestimmte Energieniveaus der Elektronen oft keine Energie zum Übergang eines Elektrons nach dem benachbarten Atom mehr erforderlich ist.

c) Bändertheorie und Leitfähigkeit

Das Bändermodell gestattet, in einfacher Weise eine Aussage über die elektrische Leitfähigkeit des betrachteten Stoffes zu treffen. Sind nämlich alle Bänder voll besetzt, so kann keine elektrische Leitfähigkeit vorhanden sein. Die Bewegung eines Elektrons in einem vollbesetzten Band kann nur dadurch erfolgen, daß ein zweites Elektron seinen Platz mit dem ersten vertauscht. Daraus resultiert jedoch kein Elektrizitätstransport. Es liegt der Fall eines Isolators vor (Leitfähigkeit Größenordnungsmäßig $< 10^{-10} \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). Anders können sich die Leitfähigkeitsverhältnisse gestalten, wenn das oberste Band leer und das nächsttiefe voll besetzt ist und außerdem der Abstand beider Bänder in der Größenordnung der thermischen Energie (kT) liegt. Dann können durch thermische Beeinflussung Elektronen aus dem vollen in das leere Band übergehen; der Stoff wird als Halbleiter bezeichnet (Eigenhalbleiter nach WILSON). Er bleibt ein Isolator, wenn der Abstand der erlaubten Bänder groß gegen kT ist. Soll ein Stoff metallische Leitfähigkeit zeigen (Größenordnung der Leitfähigkeit 10^4 bis $10^6 \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), so darf ein oberes Band, z. B. das s -Band, nur teilweise gefüllt sein (siehe Tab. 1, z. B. der Fall Na). Man spricht bei einem nur teilweise gefüllten Band von einem Leitfähigkeitsband. Danach müssen jedoch die Metalle, deren s -Band gefüllt ist, als Isolatoren angeprochen werden (vgl. Mg). Es zeigt sich aber, daß auch eine Überlappung von Energiebändern auftreten kann, d. h. daß beispielsweise die obere Grenze des s -Bandes über der unteren Grenze des p -Bandes zu liegen kommen kann. Die tiefsten Energieniveaus des p -Bandes werden nun, da sie stabilere Zustände als die höheren Energieniveaus des s -Bandes darstellen, von den s -Elektronen eingenommen. Dadurch

wenn $E_{A,B}$ die Energiedifferenz zwischen dem oberen Rande des vollbesetzten (A) und dem unteren Rande des leeren Energiebandes (B) bedeutet. Der Fall der Eigenhalbleitung ist sehr selten beobachtet worden. Viel häufiger tritt Elektronenleitung in gestörten Halbleitern auf. Durch Fremdatome oder durch irgendwelche Störungen anderer Art bilden sich in der verbotenen Zone zwischen den erlaubten Energiebändern A und B schmale Energietufen S aus, wodurch die notwendige Energie für den Übergang der Elektronen beträchtlich herabgesetzt wird. In den Abb. 5a und b sind zwei mögliche Fälle zur

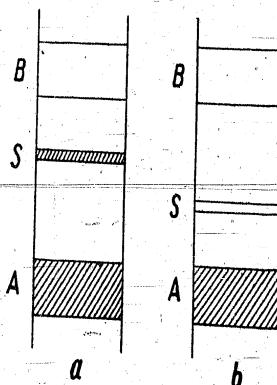


Abb. 5. Bändermodelle von Störhalbleitern.

Falle spricht man von Elektronenersatzleitung und kennzeichnet die Halbleiter mit den Namen Ersatz-, Defekt- oder Mangelhalbleiter, im ersten Falle hingegen spricht man von Elektronenüberschußhalbleiter. Beide Leitungsarten lassen sich experimentell durch Feststellung des Vorzeichens ihres Halleffektes unterscheiden. Negativer Halleffekt entspricht einem normalen Elektronenfluß, positiver hingegen einem Fluß der Defektelektronen.

f) Einteilung der Störhalbleiter

Die Gruppe der Störhalbleiter wird nach den heutigen Anschauungen zweckmäßig in zwei Untergruppen aufgeteilt, von denen die erste alle die Verbindungen enthält, deren Störatome chemisch mit

einer Art der Gitteratome übereinstimmen, hingegen die zweite alle jene Verbindungen, bei denen die Störatome in irgendwelchen andersgearteten Beziehungen zu den Gitteratomen der Grundsubstanz stehen. Die erste der beiden Untergruppen muß daher alle Halbleiter umfassen, deren Kennzeichen in einer stöchiometrischen Unschärfe ihres chemischen Aufbaues bestehen. Eine stöchiometrische Unschärfe kann auf verschiedene Weise entstehen: 1. in einem sonst regelmäßigen Gitter sitzen zusätzliche Bausteine einer Komponente der Grundsubstanz auf Zwischengitterplätzen (besonders bevorzugt, wenn der Durchmesser der Bausteine der eingesetzten Komponente kleiner ist als die Durchmesser der übrigen Gitterbausteine), 2. durch Bildung von Gitterleerstellen entsteht ein Überschuß der Komponente, die im Idealkristall den fehlenden Gitterbausteinen zugeordnet sein müßte, und 3. ein Teil der Gitterbausteine einer Komponente ist durch Gitterbausteine der anderen noch am Kristallaufbau beteiligten Komponente ersetzt (bei Ionenverbindungen nicht möglich).

Die Anzahl N der von den Störstellen nach dem unbesetzten Band bzw. vom besetzten Band nach den Störstellen übergehenden Elektronen ergibt sich zu

$$N = C_1 n_s^{1/2} T^{3/2} e^{-\frac{E_{S,B}}{2T}} \quad (5a)$$

und

$$N = C_2 n_s^{1/2} T^{3/2} e^{-\frac{E_{A,S}}{2T}} \quad (5b)$$

wenn n_s die Anzahl der Störstellen und $E_{S,B}$ bzw. $E_{A,S}$ die Energiedifferenzen zwischen dem unbesetzten Band und den Störstellen niveaus bzw. zwischen dem vollen Band und den Störstellen niveaus bedeuten und außerdem $N \ll n_s$ gilt. Sind jedoch von den n_s Störstellen niveaus nur ein Teil, etwa n , mit Elektronen besetzt, so ist für $n \ll n_s$ und $N \ll n$ das Gleichungspaar

$$N = c_1 n T^{3/2} e^{-\frac{E_{S,B}}{T}} \quad (6a)$$

und

$$N = c_2 n T^{3/2} e^{-\frac{E_{A,S}}{T}} \quad (6b)$$

gültig. Sowohl für (5) als auch für (6) muß Eigenhalbleitung ausgeschlossen sein und außerdem der betrachtete Temperaturbereich so

Gesetzmäßigkeiten

liegen, daß Änderungen der stöchiometrischen Verhältnisse nicht auftreten können. Die Ähnlichkeit der Gleichungspaares (5) und (6), die der Form nach nahezu mit der Gleichung (4) übereinstimmen, liegt auf der Hand.

Solche Halbleiter, die je nach dem Überschuß der positiven oder der negativen Komponente Überschuß- oder Ersatzleitung zeigen, werden mit dem Namen „amphotere Halbleiter“ belegt.

In der Tab. 2 sind einige Beispiele für die verschiedenen Möglichkeiten der elektronischen Leitung angeführt.

Tab. 2. Beispiele für Elektronenleiter

Überlappung eines besetzten und eines leeren Bandes:	Bi
Verbindungen mit metallischer Leitfähigkeit:	Ti O, Cu S, Ti N, Zr N, V C, Ti C, Ta C, Zr C
Eigenhalbleiter:	Cu ₂ O
Halbleiter mit stöchiometrischer Unschärfe:	Mg O, Ca O, Ba O, Zn O, Cd O, Al ₂ O ₃ , Ti O ₂ , Th O ₂ , W O ₃ , Fe ₂ O ₃ , sämtlich mit Sauerstoffmangel; vorfarbte Alkalihalogenide
a) Überschüßhalbleiter:	Fe O, Co O, Ni O, Cu ₂ O, sämtlich mit Sauerstoffüberschuß; K J, Cu J, Cu Br, Ag Cl, Ag Br, sämtlich mit Halogenüberschuß
b) Ersatzhalbleiter:	Pb S, Pb Se, UO ₂
c) Amphotere Halbleiter:	Na Cl; Diamant
Isolatoren:	

Die spezifische Leitfähigkeit σ ist proportional der Zahl der Leitungselektronen (bzw. Löcher) N und proportional deren Beweglichkeit v . Es gilt daher

$$\sigma = v e N, \quad (6c)$$

falls e die Elektronenladung darstellt. Daraus wiederum folgt für σ eine Temperaturabhängigkeit mit dem Faktor $e^{-E/2T}$ bzw. für den

§ 1. Allgemeine Betrachtungen

spezifischen Widerstand ρ eine Abhängigkeit von der Temperatur der Form

$$\rho = \rho_0 e^{b/T}, \quad (6d)$$

wobei b eine temperaturunabhängige Konstante darstellt, während ρ_0 schwach temperaturabhängig ist. Daher läßt sich für den Temperaturkoeffizienten des Widerstandes (β) schreiben

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d \rho}{dT} = - \frac{b}{T^2} \quad (6e)$$

bzw.

$$\beta = \frac{\log \rho - \log \rho_0}{T} \quad (6f)$$

Für Metalle gilt bei nicht zu niedriger Temperatur, daß der spezifische Widerstand ρ_m ungefähr proportional der Temperatur ist, also

$$\rho_m = c T, \quad (6g)$$

woraus für β_m folgt

$$\beta_m = \frac{1}{\rho_m} \frac{d \rho_m}{dT} = \frac{1}{T}. \quad (6h)$$

g) Erweitertes Bänderschema

Das in II, § 1 skizzierte sogenannte WILSON-FOWLERSche Bänderschema ist verschiedentlich erweitert worden. Insbesondere haben RIEHL und SCHÖN durch Einführung von zwei Gruppen von Termen zwischen vollbesetztem Band (A) und leerem Band (B), den Aktivatorterminen und den Anlagerungstermen, ein Modell geschaffen, welches seine Brauchbarkeit bei der Erklärung der Lumineszenzeigenschaften der Kristallphosphore bereits bewiesen hat und neuerdings mit überraschender Wirkung auch die Erscheinungen der lichtelektrischen Leitung zu erklären gestattet. Die mehr oder weniger lokalisiert liegenden Aktivatorterme, die alle voll besetzt sind, befinden sich unmittelbar über dem vollen Bande (A), so daß beim Übergang eines Elektrons aus dem vollen Bande ins leere Band das entstandene Loch sofort oder nach einer gewissen Zeit durch ein Elektron eines der Aktivatorterme wieder ausgefüllt werden kann. Die ebenfalls lokalisiert zu denkenden Anlagerungsterme sind leer und liegen ihrerseits unmittelbar unter dem leeren Bande (B). Etwa in die Aktivatorterme zurückfallende angeregte Elektronen (unter Emission eines Licht-

quants) stammen aus dem Bande (B), in das sie aus A (etwa durch Absorption eines Lichtquants geeigneter Frequenz) gehoben wurden, indem sie entweder direkt von B oder indem sie nach vorübergehendem Aufenthalt in den Anlagerungstermen (Haftstellen) in die Aktivatorterme übergehen.

h) Ionenleiter

Im Gegensatz zu den Elektronenleitern bezeichnet man diejenigen festen Stoffe, bei denen die elektrische Leitfähigkeit durch Ionen hervorgerufen wird, als Ionenleiter. In jedem Ionenleiter werden jedoch am Elektrizitätstransport Elektronen, wenn auch in geringem Maße, teilnehmen, so daß praktisch nur von gemischter Leitung gesprochen werden darf. Erkenntlich ist die Ionenleitung fester Körper daran, daß die gleichen Gesetzmäßigkeiten, die für die elektrolytische Leitung maßgebend sind, auch hierfür gelten. Demzufolge muß auch eine Abscheidung an den Elektroden erfolgen, so daß eine Polarisationsspannung auftritt. Die Ionenleitung heißt unipolar, wenn nur eine Ionenart wandert, hingegen bipolar, wenn sich beide Ionenarten an der Leitung beteiligen.

Mit der Ionenleitung ist also ein Massentransport verbunden. Ein solcher tritt auch bei den Diffusionserscheinungen auf.

Nach Überlegungen von SCHOTTKY und WAGNER sind bei allen Kristallen für $T \neq 0^\circ K$ einige Atome oder Ionen im Kristall fehlgeordnet. Ändert sich die Temperatur, so muß sich auch das Fehlordnungsgleichgewicht neu einstellen, wodurch eine Wanderung der Fehlstellen feststellbar wird. Fehlstellen entstehen entweder durch reine Leerstellenbildung (Fehlordnung nach SCHOTTKY) oder durch Besetzen von Zwischengitterplätzen oder durch Leerstellenbildung und Besetzen von Zwischengitterplätzen (Fehlordnung nach FRENKEL). In allen drei Fällen können beide Ionen- oder Atomarten in gleicher Anzahl bei der Bildung der Leerstellen oder bei der Besetzung der Zwischengitterplätze beteiligt sein (stöchiometrische Zusammensetzung), oder aber auch nur eine der beiden Ionen- oder Atomarten (stöchiometrischer Überschluß).

Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Ionenhalbleiter σ , die auch durch Fremdionen hervorgerufen sein kann, von der Temperatur wird nach SMEKAL durch die Gleichung

$$\sigma = A_1 e^{-\frac{B_1}{T}} + A_2 e^{-\frac{B_2}{T}} \quad (7)$$

§ 2. Begriff der Austrittsarbeit

dargestellt. Hierbei muß $A_1 \ll A_2$ und $B_1 < B_2$ sein. Der erste Summand überwiegt bei tiefer Temperatur (Tieftemperatureffekt, strukturbedingt), der zweite bei hoher Temperatur (Hochtemperatureffekt, strukturunempfindlich).

§ 2. Begriff der Austrittsarbeit

a) Definition der Austrittsarbeit

Wird unter E_a der Energiebetrag verstanden, der notwendig ist, um gegen die Anziehungskräfte der positiven Ionen ein Elektron mit der Energie Null aus dem Metall herauszubringen, so stellt die Differenz $E_a - E_i$ offenbar den kleinsten Energiebetrag dar, den aufgewendet werden muß, um eine Elektronenemission hervorzurufen (E_i Grenzenergie, vgl. II, § 1d). Allerdings kommt als Bedingung hinzu, daß die Elektronen eine genügend große Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Austrittsfläche haben müssen. Stellt φ die Austrittsarbeit und e die Elektronenladung dar, so gilt die Gleichung

$$e\varphi = E_a - E_i. \quad (8)$$

b) Bildkraft

Die Wirkung der Anziehungskräfte, die das Austreten der Elektronen aus dem Metall verhindern, ist in erster Linie auf die Existenz der SCHOTTKYSchen Bildkraft zurückzuführen. Wird nämlich ein Elektron aus der Schichttiefe x um die gleiche Wegstrecke x von der Emissionsoberfläche entfernt, so macht sich die elektrostatische Anziehungskraft geltend, d. h. das Elektron wird mit einer solchen Kraft angezogen, als stände im Innern des Metalls im Abstand x von der Emissionsoberfläche eine der Elektronenladung gleich große, jedoch positive Ladung. Die Bildkraft besitzt nach dem COULOMBSchen Gesetz den Wert

$$K_B = -\epsilon^2/(2x)^2. \quad (9)$$

Die der Bildkraft entsprechende Feldstärke ergibt sich zu

$$F_B = \epsilon/4x^2 \quad (10)$$

und das Bildkraftpotential zu

$$U_B = \int_a^\infty F_B dx = -\epsilon/4a. \quad (11)$$

Da für $a = 0$ das Bildkraftpotential unendlich wird, ist es zweckmäßig, einen kritischen Abstand a_0 einzuführen, so daß die Gleichung (11) von a_0 bis ∞ Gültigkeit besitzt⁶). Unterhalb a_0 soll das Potential mit der Entfernung linear abfallen. Der Abszissenwert des Berührungs- punktes der Tangente an die Potentialkurve, die gleichzeitig die Ab- szisse im Nullpunkt schneidet, wird als kritischer Abstand a_0 gewählt (vgl. Abb. 6). Physikalisch läßt sich die Einführung des kritischen

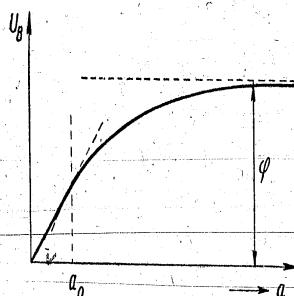


Abb. 6. Bildkraftpotential.

Doppelschicht zur Bildung der Potentialsschwelle bei, die die Elektronen an der Grenzschicht Metall-Gasraum bzw. Metall-Vakuum überwinden müssen. Die Doppelschicht entsteht dadurch, daß die Metall- atome an der Oberfläche unter dem Einfluß der nach innen gerichteten elektrischen Felder polariert werden. Die Po- tentialschwelle an der Grenze Metall-Vakuum wird also einen Gesamt- verlauf nehmen, wie er etwa in Abb. 7 schematisch wiedergegeben ist. A stellt die Grenzfläche zwischen dem Metall (M) und dem Vakuum (V) dar. Die Differenz $E_a - E_i$ erfüllt die Gleichung (8).

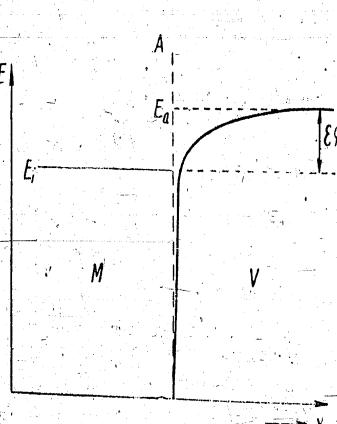


Abb. 7. Potentialschwelle an der Grenze Metall-Vakuum.

c) Kontaktpotential

Besitzt ein Metall eine große Austrittsarbeit, so übt es demnach eine starke Anziehungskraft auf die Elektronen aus. Zwei an Erde liegende Elektroden im Vakuum mit verschiedener Austrittsarbeit (φ und φ_{An}) werden daher eine Potentialdifferenz gegeneinander aufweisen, und zwar wird sich die Elektrode mit der größeren Austrittsarbeit

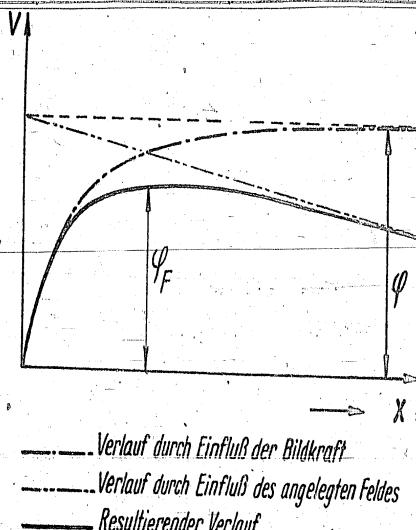


Abb. 8. Potentialverlauf, hervorgerufen durch Bildkraft und angelegtes Feld.

negativ der anderen gegenüber aufladen. Die Potentialdifferenz wird als das Kontaktpotential K bezeichnet und ist der negativen Differenz der Austrittsarbeiten gleich⁷),

$$K = -(\varphi - \varphi_{An}). \quad (12)$$

Das Metall mit größerer Austrittsarbeit wird dem mit kleinerer Aus- trittsarbeit gegenüber als elektronegativ bezeichnet.

d) Herabsetzung der Austrittsarbeit

Legt man an die Metalloberfläche ein elektrisches Feld F , so wird die Austrittsarbeit um den Betrag $\sqrt{\epsilon F}$ herabgesetzt (SCHOTTKY- Effekt):

$$\varphi_F = \varphi - \sqrt{\epsilon F}. \quad (13)$$

Götlich, Die photoelektrischen Zellen

Reicht die eingestrahlte und den Elektronen übertragene Energie gerade hin, daß die Photoelektronen die Austrittsarbeit $\epsilon\varphi$ überwinden, d. h. daß die austretenden Elektronen die Energie Null besitzen, so geht (17) in die Gleichung

$$\epsilon\varphi = h\nu_0 (= E_a - E_i) \quad (18)$$

über. ν_0 stellt daher gerade diejenige charakteristische Frequenz dar, die notwendigerweise eingestrahlt werden muß, um Elektronen der Geschwindigkeit Null aus der Oberfläche herauszubringen. Die Frequenz ν_0 wird als Grenzfrequenz bezeichnet. Wegen der Beziehung

$$h\nu_0 = hc/\lambda_0 \quad (19)$$

bzw.

$$\lambda_0 = hc/\epsilon\varphi (= 1236/\varphi \text{ m}\mu, \text{ wenn } \varphi \text{ in Volt gegeben ist}), \quad (19a)$$

worin c die Lichtgeschwindigkeit bedeutet, kann die Aussage über die Möglichkeit einer lichtelektrischen Emission auch durch den Begriff der langwelligen oder roten Grenze λ_0 getroffen werden. Es muß dann heißen, daß bei Einstrahlung einer Wellenlänge, die größer als λ_0 ist, keine Emission mehr stattfindet.

Drückt man die Bewegungsenergie der Elektronen $mv^2/2$ durch

$$mv^2/2 = \epsilon V \text{ (in Elektronenvolt)} \quad (20)$$

aus, so kann der Inhalt der Gleichungen (17) und (18) auch in der Form

$$\epsilon V = h(\nu - \nu_0) \quad (21)$$

zum Ausdruck gebracht werden.

d) Die FOWLERschen Gleichungen

Die Grenzfrequenz ν_0 ist nur für eine Temperatur $T = 0^\circ K$ scharf definiert. Für Temperaturen $T \neq 0^\circ K$ besitzen die Elektronen thermische Zusatzenergien, so daß auch bei Aufnahme eines Energiequants $h\nu < h\nu_0$ die Austrittsschwelle von den Elektronen überwunden werden kann. Es wird also eine Unschärfe der langwelligen Grenze zu beobachten sein. Auf Grund der SOMMERFELDschen Metallelektronentheorie läßt sich die Zahl der Elektronen N berechnen, die eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Oberfläche besitzen und da-

her unter Aufnahme eines $h\nu$ in der Lage sind, das Metall zu verlassen.

Die diesbezüglichen FOWLERschen Gleichungen⁹⁾ lauten:

$$N = \frac{2\sqrt{2\pi m^{3/2}}}{h^3} \frac{(kT)^2}{(E_a - h\nu)^{1/2}} \left[e^\alpha - \frac{e^{2\alpha}}{2^2} + \frac{e^{3\alpha}}{3^2} \mp \dots \right] \quad (22a)$$

für $\alpha \leq 0$ und

$$N = \frac{2\sqrt{2\pi m^{3/2}}}{h^3} \frac{(kT)^2}{(E_a - h\nu)^{1/2}} \left[\frac{\pi^2}{6} + \frac{\alpha^2}{2} - \left(e^{-\alpha} - \frac{e^{-2\alpha}}{2^2} + \frac{e^{-3\alpha}}{3^2} \mp \dots \right) \right] \quad (22b)$$

für $\alpha \geq 0$. Unter α wird dabei

$$\alpha = \frac{h(\nu - \nu_0)}{kT} \quad (23)$$

verstanden. Zunächst erkennt man, daß für $T = 0$ und $h\nu \leq h\nu_0$, also $\alpha \leq 0$, $N = 0$ wird, sodann, daß N für $h\nu \geq h\nu_0$, also $\alpha \geq 0$, proportional $(h\nu - h\nu_0)^2$ ist. Für $\nu = \nu_0$ wird N proportional dem Quadrat der absoluten Temperatur. Führt man an Stelle der Anzahl der Elektronen N den lichtelektrischen Strom i , der proportional N sein muß, ein, so lassen sich die Gleichungen (22) offenbar in der Form

$$\frac{i(E_a - h\nu)^{1/2}}{T^2} = C_1 f_1(\alpha) \quad (24)$$

schreiben, wobei die Konstante C_1 unabhängig von ν und T ist und die Funktion $f_1(\alpha)$ den Ausdrücken der eckigen Klammern in (22) entspricht. Ist ν von ν_0 sehr wenig verschieden, so kann $(E_a - h\nu)^{1/2}$ als konstant und gleich $E_a^{1/2}$ angesehen werden. In logarithmischer Schreibweise ergibt sich sodann

$$\log i/T^2 = C_2 + f_2(\alpha), \quad (25)$$

worin für $\alpha \leq 0$

$$f_2(\alpha) = \log \left[e^\alpha - \frac{e^{2\alpha}}{2^2} + \frac{e^{3\alpha}}{3^2} \mp \dots \right] \quad (26a)$$

und für $\alpha \geq 0$

$$f_2(\alpha) = \log \left[\frac{\pi^2}{6} + \frac{\alpha^2}{2} - \left(e^{-\alpha} - \frac{e^{-2\alpha}}{2^2} + \frac{e^{-3\alpha}}{3^2} \mp \dots \right) \right] \quad (26b)$$

bedeutet. Die FOWLERschen Gleichungen (22) sind für $\nu > \nu_0$ nicht mehr gültig. Offenbar überwiegt bei höheren Frequenzen die quantenhafte Übertragung der Strahlungsenergie an Elektronen, die stärker an das Metallgitter gebunden sind.

e) Quantenäquivalent (2. Quantenbeziehung)

Die zweite Quantenbeziehung, die aus quantentheoretischen Überlegungen folgt,

$$N = \frac{\Phi_{ab}}{h\nu} \quad (27)$$

bezeichnet man als Quantenäquivalentgesetz. Die Gültigkeit dieser Beziehung, in der N die Zahl der durch die absorbierte Lichtenergie Φ_{ab} abgelösten Elektronen bedeutet, ist allerdings für den äußeren lichtelektrischen Effekt experimentell noch nicht sichergestellt worden, jedoch ist dies noch kein Beweis dafür, daß die Gleichung (27) nicht gelten kann oder die Verhältnisse nicht richtig beschreibt. Die Zahl N bezieht sich auf die im Innern des Metalls abgelösten Elektronen und nicht auf die der Messung zugänglichen ausgetretenen Elektronen. Da jedoch mit Verlusten zu rechnen ist, kann das Erreichen des Quantenäquivalentes, falls man sich experimentell nur auf die ausgetretenen Elektronen stützt, kaum erwartet werden*).

§ 4. Die Grundlagen des inneren lichtelektrischen Effektes

a) Der lichtelektrische Primärstrom

Die in einem Halbleiter oder Isolator durch Strahlungsenergie primär abgelösten und sich in der Feldrichtung bewegenden Elektronen sowie ihr Ersatz bilden nach GUDDEN und POHL den lichtelektrischen Primärstrom. An einem isolierenden Kristall (vgl. Abb. 10) wird unter dem Einfluß der absorbierten Strahlung (Längsfeld- oder Querfeldbeleuchtung; s. auch IX; § 3a) eine Trennung von negativer und positiver Ladung und eine Verschiebung dieser Ladungen durch das angelegte Feld erfolgen, so daß eine Aufladung der Elektroden vom Betrage

$$Q = \frac{eN}{D} (x_1 + x_2) \quad (28)$$

* Zur Berechnung des Quantenäquivalentes, als Beispiel das der Hg-Linie 5461 Å: $\nu = 5,5 \times 10^{14} \text{ 1/sec}$, $h = 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg sec}$, $h\nu = 36,02 \times 10^{-13} \text{ erg} = 86,08 \times 10^{-21} \text{ cal}$, $e = 1,59 \times 10^{-19} \text{ Coul}$, daher das Quantenäquivalent

$$\frac{1,59 \times 10^{-19} \text{ Coul}}{86,08 \times 10^{-21} \text{ cal}} = 1,86 \frac{\text{Coul}}{\text{cal}}$$

§ 4. Die Grundlagen des inneren lichtelektrischen Effektes

beobachtet wird. Der Abstand der Elektroden ist mit D , die Strecke, um die die negativen bzw. positiven Ladungen verschoben sind, mit x_1 bzw. mit x_2 und die Zahl der abgelösten Elektronen mit N bezeichnet. Werden in der Zeiteinheit N' Ladungen getrennt, so fließt ein Strom

$$i_{ph} = \frac{eN'}{D} (x_1 + x_2). \quad (29)$$

Der durch Gleichung (29) bestimmte Primärstrom ist der absorbierten Strahlungsenergie proportional und folgt der Belichtung träge.

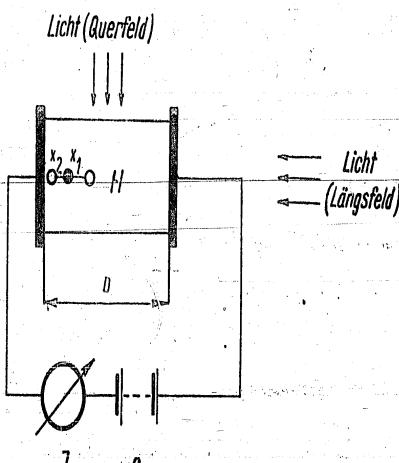


Abb. 10. Innerer lichtelektrischer Effekt.

heitslos. Mit größer werdender Feldstärke wächst der Primärstrom linear an und erreicht sodann bei größerer Feldstärke einen Sättigungswert. Durch den Vergleich der gesättigten lichtelektrischen Primärströme mit der absorbierten Strahlungsenergie kann, wie ebenfalls GUDDEN und POHL gezeigt haben, die Gültigkeit des Quantenäquivalentgesetzes nachgewiesen werden. Jedes absorbierte $h\nu$ ergibt, wenn die Sättigungsfeldstärke erreicht ist, ein nachweisbares Elektron.

Nach neueren Überlegungen von HILSCH und POHL lassen sich die Gesetzmäßigkeiten des Primärstromes zweckmäßig aus dem Begriff der Meßausbeute η' ableiten. Die Meßausbeute erfüllt die Gleichung

$$\eta' = \frac{i_{ph}}{z \epsilon}, \quad (30)$$

worin i_{ph} der primäre lichtelektrische Strom und z die Äquivalentladung der im Kristall absorbierten Lichtquanten bedeuten (z ist die Zahl der in der Sekunde absorbierten Lichtquanten). Aus der Meßausbeute errechnet sich einmal die Quantenausbeute

$$\eta = \frac{N'}{z} \quad (31)$$

und zum anderen der mittlere Weg x , den die abgelösten Elektronen zurücklegen, bezogen auf die Einheit der Sättigungsfeldstärke F ,

$$\frac{x}{F} = bt. \quad (32)$$

Unter b versteht man die Beweglichkeit der Elektronen und unter t ihre mittlere Lebensdauer im beweglichen Zustand. Mit den Gleichungen (31) und (32) erhält man zwei Größen, die für den primären Vorgang kennzeichnend sind.

b) Die Sekundärströme

Die Gesetzmäßigkeiten des Primärstromes werden durch das Auftreten von Sekundärströmen bei den elektronischen und gemischten Halbleitern fast vollständig verdeckt. Unter den Sekundärströmen wurden früher alle die Ströme verstanden, die nicht in der Bewegung der primär durch die Strahlung abgelösten Elektronen und ihres Er satzes ihre Ursache hatten, sondern als Folgeerscheinungen, besonders bei großer Primärstromdichte, zu werten waren. Das Wesen der Sekundärströme konnte in den letzten Jahren experimentell von HILSCH und POHL¹⁰ und theoretisch von SCHOTTKY so weit aufgeklärt werden, daß es aus dem Mechanismus der Elektronenrekombination verständlich geworden ist. Die Versuche, die im wesentlichen an KH-KBr-Mischkristallen ausgeführt worden sind, lassen den Schluß zu, daß für den Mechanismus des Sekundärstromes zwei Größen eines Gemischleiters, der eine gewisse elektronische Dunkelleitfähigkeit besitzt, maßgebend sind, nämlich 1. das Verhältnis der Elektronen-Dunkelleitfähigkeit zur Gesamtdunkelleitfähigkeit σ_e/σ_d und 2. das Verhältnis des mittleren Elektronenweges zum Elektrodenabstand x/D . Durch die Belichtung des Kristalls wird zunächst der Primärstrom erzeugt und damit vor der Kathode eine Erhöhung des Feldes.

§ 4. Die Grundlagen des inneren lichtelektrischen Effektes

Die Folge davon ist eine Steigerung der Zahl der aus der Kathode austretenden Elektronen, ohne daß die Elektronendichte vor der Kathode vergrößert wird. Der Weg x , den die Elektronen im beweglichen Zustand durchlaufen, kann nun größer als der Elektrodenabstand, D werden, so daß als Folge des Lichtabsorptionsaktes nicht nur ein Elektron, wie es das Quantenequivalent bei der Absorption eines Lichtquantes fordert, im Feld bewegt wird, sondern daß mehrere, größtordnungsmäßig 10 bis 100 Elektronen, den Kristall durchlaufen. Der lichtelektrische Primäreffekt besteht in der Bildung von H und von Farbzentren aus KH. Bis zur Wiedervereinigung von K und H zu einer Molekel KH vergeht eine gewisse Zeit, wodurch die Trägheit, mit der die Sekundärströme behaftet sind, erklärt werden kann.

An Gesetzmäßigkeiten für den Sekundärvorgang ergibt sich daher, daß der Sekundärstrom i_s proportional der Feldstärkenänderung ΔF an der Kathode sein muß, also der Gleichung

$$i_s = k_1 \Delta F a_e \quad (33)$$

genügt. Hieraus folgt, wie man leicht nachweisen kann, die Gültigkeit der Beziehung (34) zwischen i_s und i_{ph} ,

$$i_s = k_2 i_{ph}. \quad (34)$$

Unter der Bedingung, daß ein exponentielles Verlustgesetz gilt und außerdem das Feld im Innern des Kristalls auch bei Belichtung homogen bleibt, läßt sich ein allgemeingültiges Gesetz für alle lichtelektrischen Ströme in Kristallen ableiten, welches, da ein Verlustgesetz als gültig vorausgesetzt worden ist, nicht nur für den Fall der Sättigung, sondern auch für Feldstärken unterhalb der Sättigung angesetzt werden kann,

$$\eta' = \frac{\eta k \left[1 - k \left(1 - e^{-\frac{1}{k}} \right) \right]}{1 - k_2 k \left(1 - e^{-\frac{1}{k}} \right)} \quad (\text{nach HILSCH u. POHL}). \quad (35)$$

Die in (34) und (35) vorkommende Konstante k_2 stellt den Elektronenanteil des Dunkelstromes dar. k erfüllt in Gleichung (35) die Beziehung

$$k = x/D. \quad (36)$$

c) Die lichtelektrische Leitung im Lichte des Bändermodells

Es war unbefriedigend, die Erscheinungen der lichtelektrischen Leitung lange Zeit nicht konsequent unter Benutzung des Bändermodells verstehen zu können. Die Untersuchungen an CdS-Einkristallen eröffneten jedoch der Anwendung des Bändermodells, insbesondere des erweiterten RIEHL-SCHÖNSCHEN (vgl. II, § 3g), den Weg, die Erscheinung der lichtelektrischen Leitung mit seiner Hilfe konsequent zu erklären¹¹⁾.

Durch die Absorption von Lichtquanten entsprechender Frequenz im Gebiet der Grundgitterabsorption werden Elektronen vom vollbesetzten Band *A* ins leere Leitfähigkeitsband *B* gehoben. Die Löcher im Band *A* werden durch Elektronenübergänge im wesentlichen aus den Aktivatortermen wieder aufgefüllt, so daß die Rekombination von Elektronen zu Übergängen vom Leitfähigkeitsband *B* in die Aktivatorterme führt, natürlich unter teilweiser vorübergehender Besetzung der Haftstellen. Man kann also von einer Lokalisierung positiver Ladungen sprechen und annehmen, daß der Stromtransport beim Anlegen eines Feldes im wesentlichen durch die Elektronen im Leitfähigkeitsband *B* besorgt wird. Die Elektronen werden im Felde eine gerichtete Geschwindigkeit erlangen und die Größe des Photostromes wird durch die Elektronenbeweglichkeit und durch die Elektronenkonzentration im Leitfähigkeitsband bestimmt. Die Elektronenkonzentration ist abhängig von der Zahl der absorbierten Lichtquanten und außerdem von einem Rekombinationskoeffizienten, der über die Zahl der Übergänge vom Leitfähigkeitsband in die Aktivatorterme Auskunft gibt.

Im Gebiet der Störstellenabsorption, also im Ausläufergebiet, werden die Elektronen von den Aktivatortermen in das Leitfähigkeitsband und vom vollen Band in die Haftstellen springen.

Der Begriff des Sekundärstromes wird ersetzt durch den Begriff „Verstärkungsfaktor“. Quantenausbeuten über 1 lassen sich dadurch erklären, daß neben den lichtelektrischen Elektronen noch von der Kathode eingewanderte Elektronen an der Leitung teilnehmen. Im Falle des CdS liegt die Fermigrenze unter dem unteren Rande des Leitfähigkeitsbandes und daher ist ein Einwandern von Elektronen aus der Kathode nicht ohne weiteres möglich, aber durch Anlegen

§ 4. Die Grundlagen des Sperrsichtphotoeffektes

des äußeren Feldes geraten die lichtelektrischen Elektronen in Bewegung, hinter sich eine positive Raumladung zurücklassend, die von den Löchern herrührt. Das durch diese Raumladung hervorgerufene Feld läßt die Zuwanderung von Elektronen aus der Kathode zu, und zwar wird die Konzentration durch die Zahl der positiven Löcher bestimmt. Weil nun jedes der positiven Löcher während seiner Lebensdauer einer größeren Anzahl von Elektronen das Durchlaufen

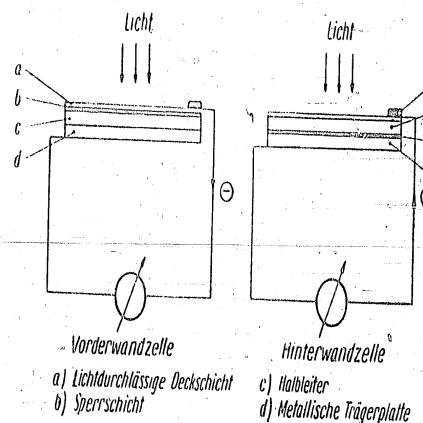


Abb. 11. Vorderwand- und Hinterwandsperrsichtzellen.

möglich macht, weil also die Beweglichkeit der Elektronen größer ist als die Beweglichkeit der Löcher, kommt es zu einer „Verstärkung“ der lichtelektrischen Elektronen.

§ 5. Die Grundlagen des Sperrsichtphotoeffektes

a) Beziehung zwischen Photostrom bzw. Photospannung und Lichtintensität

Der durch eine Sperrsichtzelle (Photoelement) erzeugte Photostrom sowie die Photospannung (vgl. Abb. 11) hängen außer von der Beleuchtungsstärke auch vom äußeren Widerstand ab. Ist der Außenwiderstand Null, so fließt der Kurzschlußstrom i_K , der für geringe Beleuchtungsstärken E (etwa bis zu 300 Lux) dieser proportional ist,

$$i_K = C_1 E \quad (37)$$

bzw.

$$i_K = C_2 \Phi, \quad (38)$$

worin C_1 bzw. C_2 ein Maß für die Empfindlichkeit der Sperrsichtzelle darstellen. Für die Leerlaufspannung e_L (Außenwiderstand $R_a = \infty$) ergibt sich eine logarithmische Abhängigkeit von der Belichtungsstärke

$$e_L = C_3 \log E. \quad (39)$$

b) Notwendigkeit einer Sperrsicht

Für das Auftreten eines Sperrsichtphotoeffektes an einer Halbleiter-Metall-Kombination ist das Vorhandensein einer unipolar leitenden Sperrsicht zwischen Halbleiter und Metall notwendig. Die Eigenschaften dieser Sperrsicht sind nicht nur für den Sperrsichtphotoeffekt, sondern in gleichem Maße auch für den Gleichrichtermechanismus der Trockengleichrichter entscheidend. Das Wesen der Sperrsicht aufzuklären, heißt daher, die Kenntnis sowohl des Gleichrichtereffektes als auch des Sperrsichtphotoeffektes zu vertiefen. Ob das Gleichgewicht, in dem sich die Halbleiter-Metall-Kombination befindet, durch Heben oder Senken der Energiebänder unter Anlegung eines elektrischen Feldes gestört wird (Gleichrichtereffekt) oder dadurch, daß durch Belichtung der Halbleiterschicht Elektronen in höhere Niveaus gehoben werden, von wo sie in der Lage sind, die Potentialschwelle (als solche wirkt die Sperrsicht) zu überwinden (Sperrsichtphotoeffekt), ist von sekundärer Bedeutung¹²⁾. Übereinstimmend für Sperrsichtphotoeffekt und Gleichrichtereffekt ergibt sich, daß die Photoelektronen in der Sperrrichtung des Gleichrichters fließen.

c) Chemische Sperrsicht

Man unterscheidet die chemische von der physikalischen Sperrsicht. Letztere allein genügt, um die notwendige Unipolarität an einer Halbleiter-Metall-Kombination hervorzurufen.

Eine chemische Sperrsicht entsteht, wenn stöchiometrische Unterschiede im Halbleiter auftreten. Man kann sich dann das Auftreten der Unipolarität in verschiedener Weise vorstellen. Nach VAN GEEL¹³⁾ beispielsweise (vgl. Abb. 12) fließen die Elektronen vom Metall zum Halbleiter besser (Abb. 12b) als umgekehrt (Abb. 12c). Wegen des wellenmechanischen Tunneleffektes können die Elektronen den Po-

§ 5. Die Grundlagen des Sperrsichtphotoeffektes

tentialberg zwischen Metall und Halbleiter durchdringen und gelangen in ein leeres Band des Halbleiters. Umgekehrt könnten die Elektronen zwar ebenfalls den Potentialberg überwinden, jedoch befindet sich oberhalb des Grenzniveaus kein gefülltes Band des Halbleiters, welches Elektronen abzugeben in der Lage wäre. Zur Erklärung des wellenmechanischen Tunneleffektes sei hinzugefügt, daß nach der wellenmechanischen Theorie Elektronen einen Potentialberg durchsetzen können, wenn auch ihre Energie nach der klassischen Theorie

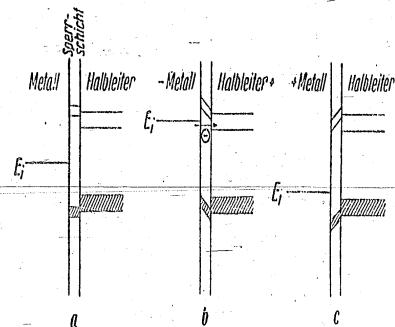


Abb. 12. Gleichrichterwirkung nach VAN GEEL.

an sich nicht ausreicht, den Potentialberg zu überwinden. Für eine Energie $E > U$, wobei U die Höhe der Potentialschwelle darstellt, überwinden alle Elektronen nach den klassischen Überlegungen den Potentialberg. Falls jedoch $E < U$ ist, kann nach klassischen Vorstellungen kein Elektron auf die andere Seite des Potentialberges gelangen, hingegen zeigen wellenmechanische Betrachtungen, daß eine gewisse Anzahl von Elektronen den Potentialberg durchdringen. Die Anzahl der den Potentialberg durchsetzenden Elektronen zur Anzahl der gesamten auf den Potentialberg auftreffenden Elektronen nimmt exponentiell mit größer werdender Differenz $U - E$ ab. Nach MOTT¹⁴⁾ spielt der wellenmechanische Tunneleffekt beim Gleichrichter keine so entscheidende Rolle, sondern durch eine in der Sperrsicht abnehmende Störstellenkonzentration können, falls der Gleichgewichtszustand (vgl. Abb. 13a) durch das Anlegen eines Feldes gestört wird, Elektronen in das unbesetzte Halbleiterband springen (Abb. 13b); umgekehrt jedoch fehlt es im obersten Halbleiterband an Elektronen,

die abgegeben werden könnten (Abb. 13 c), so daß ein Sprung unterbleibt.

d) Physikalische Sperrsicht

Die physikalische Sperrsicht beruht auf einem ausgesprochenen Randeffekt¹⁵⁾. Das Elektrodenmetall prägt dem Halbleiter eine Elektronendichte auf, die am Rande geringer ist, als sie entsprechend dem Störstellengehalt des Halbleiters sein müßte. Es tritt eine Randzone

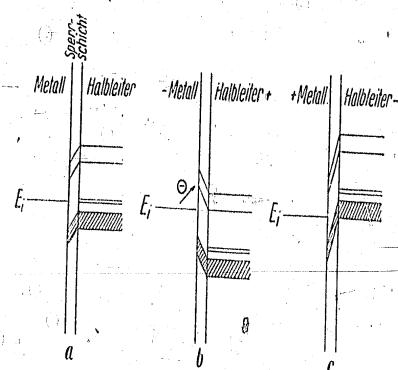


Abb. 13. Gleichrichterwirkung nach MOTT.

mit Elektronenverarmung auf. Bei einem Elektronenfluß vom Halbleiter zum Metall erhält die Randzone Elektronen aus elektronenreichen Gebieten, so daß die Randzone mit Elektronen „überschwemmt“ wird. Fließen die Elektronen umgekehrt, so „verarmt“ die Halbleiter-Metall-Kombination unipolar leiten muß. Daß die Metall-Elektrode dem Halbleiter in der Randzone eine Elektronendichte aufprägt, ergibt sich daraus, daß beim Übertritt der Elektronen vom Metall zum Halbleiter ebenso eine Austrittsarbeit überwunden werden muß wie beim Austritt der Elektronen vom Metall ins Vakuum. Metalle, die eine hohe Austrittsarbeit besitzen, erzeugen eine größere Elektronenverarmung in der Randzone. Der Übergangswiderstand für die Elektronen wird hoch sein. Ist der angrenzende Halbleiter ein Defekthalbleiter, so haben Kombinationen, die für Überschußelektronen eine hohe Austrittsarbeit besitzen, eine niedrige Austrittsarbeit für die Defektelelektronen und daher auch einen geringen Übergangs-

widerstand. Versteht man unter E die Energie, die zur Ausbildung eines Elektronenpaares (Überschußelektron und Elektronenlücke) notwendig ist, so muß die Beziehung

$$\varphi_e + \varphi_d = E \quad (40)$$

gelten (φ_e bzw. φ_d sind die Austrittsarbeiten für Überschuß- bzw. Defektelelektronen). Wenn E_e bzw. E_d die potentiellen Energien für ein

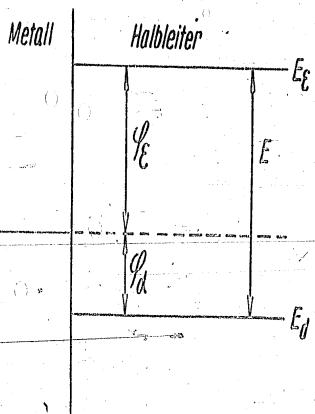


Abb. 14. Energieverhältnisse für Elektronen bzw. für Defektelelektronen im Halbleiter.

im Halbleiter ruhendes Elektron bzw. Defektelektron bedeuten (Abb. 14), so folgen weiter die Gleichungen

$$\varphi_e = E_e - E_i \quad (41a)$$

und

$$\varphi_d = E_d - E_i \quad (41b)$$

Die neueren Versuchsergebnisse scheinen mit den über die physikalische und chemische Sperrsicht entwickelten Theorien gut übereinzustimmen, während die älteren Theorien, insbesondere diejenige, die die Sperrsichtzelle als Elektronenkonzentrationselement auffaßt, oder aber, die gewisse Vergleiche zum äußeren lichtelektrischen Effekt zur Deutung heranzieht, versagen. Entweder stimmt das Vorzeichen der Belichtungsspannungen nicht, oder aber die Größe der erhaltenen Belichtungsspannung erfordert in Halbleitern mit stöchiometrischer Unschärfe unvorstellbare Elektronenkonzentrationsgefälle.

§ 1. Glühelektrische Emission

33

III. Abschnitt

Verwandte Emissionserscheinungen

Elektronen können nicht nur durch Licht ausgelöst werden, sondern der zum Elektronenaustritt notwendige Energiebetrag kann den Elektronen auch auf andere Weise zugeführt werden, z. B. durch Erhitzung des Körpers (glühelektrische oder thermische Emission), durch Beschleunigen mit Elektronen, Atomen oder positiven Ionen (Sekundäremission) oder durch Anlegen hoher elektrischer Felder (Feldemission). Unter „verwandte Emissionserscheinungen“ sollen diese genannten Emissionsarten verstanden sein. Ein kurzes Besprechen ihrer Gesetzmäßigkeiten hat den Vorteil, daß die Zusammenhänge, die teilweise mit der lichtelektrischen Emission bestehen, besser übersehen werden können, aber auch den, daß Entladungsgefäß, in denen neben dem lichtelektrischen Effekt auch die anderen Emissionsarten Anwendung finden oder auch vermieden werden müssen, verständlich werden. Es sei hierbei als Beispiel an die Elektronenvervielfacher (Anwendung der lichtelektrischen und der Sekundäremission), an die Bildwandler (Anwendung der lichtelektrischen Emission, Vermeidung der Feldemission) und an die Bildspeicherrohre (Anwendung der lichtelektrischen, der glühelektrischen und der Sekundäremission, Vermeidung der Feldemission) gedacht.

§ 1. Glühelektrische Emission

a) RICHARDSONsche Gleichung für die Glühemission

Wird ein Metall bis auf Glühtemperatur erhitzt, so nimmt die Zahl der Elektronen, die vermöge ihrer Energie $E > U$ fähig sind, die Potentialschwelle an der Grenze Metall–Vakuum zu überwinden, so stark zu, daß es zu einer glühelektrischen Emission kommt. Legt man ein hinreichend starkes Beschleunigungsfeld an, welches die Bildung einer Raumladung vor der Kathode zu verhindern vermag, so wird

der Sättigungsstrom i_s gemessen, welcher, ebenso wie beim äußeren lichtelektrischen Effekt der Emissionsstrom i_{ph} , davon abhängt, wieviel Elektronen eine zum Verlassen des Metalls notwendige Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Metalloberfläche besitzen. Je Einheit der emittierenden Oberfläche ergibt sich der Sättigungsstrom zu

$$i_s = A_{gl} T^2 e^{-\frac{e\varphi}{kT}}. \quad (42)$$

In dieser Gleichung bedeuten T die absolute Temperatur der Emissionsquelle und A_{gl} die thermische Emissions- oder Mengenkonstante. A_{gl} errechnet sich mit Hilfe der Gleichung

$$A_{gl} = 2 \frac{2\pi e k^3 m}{h^3} \quad (43)$$

zu $120,4 \text{ Amp}/\text{cm}^2 \text{ Grad}^2$. Die Gleichung (42), die unverkennbare Ähnlichkeit mit Gleichung (16a) besitzt, stammt ebenfalls von RICHARDSON und wird im allgemeinen mit dem Namen RICHARDSONsche Gleichung belegt. Klassisch kann man das Austreten der Glühelektronen als einen Verdampfungsprozeß auffassen und daher die RICHARDSONsche Gleichung aus der CLAUSIUS-CLAPEYRONschen Zustandsgleichung gewinnen.

b) Emissionstrom im Raumladegebiet

Niedrigere Beschleunigungsspannungen haben die Bildung einer Raumladung vor der Kathode zur Folge. Der Emissionsstrom i_R im Raumladegebiet selbst wird dann proportional der $3/2$ ten Potenz der Beschleunigungsspannung e_A . Also gilt

$$i_R = C e_A^{3/2}, \quad (44)$$

wenn C eine Konstante darstellt, die abhängig von der Geometrie des Entladerraumes ist (LANGMUIR). Streng gilt die Gleichung (44) nur, wenn die austretenden Elektronen die Anfangsgeschwindigkeit Null besitzen, was in Wirklichkeit nicht erfüllt ist. Die Glühelektronen folgen das MAXWELLSche Geschwindigkeitsverteilungsgesetz.

c) Emissionsstrom im Anlaufstromgebiet

Im Anlaufstromgebiet, d. i. das Gebiet negativer Spannungen, wird der Emissionsstrom i_A durch ein Exponentialgesetz der Form

$$i_A = i_s e^{e_A/e_0} \quad (45)$$

beschrieben. e_A stellt ebenso wie in Gleichung (44) die Anodenspannung unter Berücksichtigung des Kontaktpotentials (vgl. II, § 2c) zwischen Anode und Kathode dar,

$$e_A = e_{An} + \varphi - \varphi_{An} \quad (46)$$

und e_0 die der mittleren Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen entsprechende Spannung. Für e_0 gilt

$$\frac{e_0}{e} = \frac{kT}{e} = 8,61 \times 10^{-5} T \text{ (in Volt).} \quad (47)$$

Trägt man den log des Anlaufstromes als Funktion von e_A auf, so ergibt sich die Anlaufstromgerade, deren Neigung nur von der Temperatur der Kathode abhängt. Sie geht bei niedrigerer KathodenTemperatur und steigender Spannung direkt in das Sättigungsgebiet über. Erst bei höheren Temperaturen der Kathode bildet sich das Raumladengebiet aus. Die Anlaufstromkurven geben ein bequemes Mittel an die Hand, den Sättigungsstrom zu messen. Insbesondere wird davon Gebrauch gemacht, wenn der Sättigungsstrom von oxydierten Kathoden bestimmt werden muß¹⁶).

§ 2. Sekundäremission

a) Theoretische Betrachtungen

Beschränkt man sich lediglich auf die Beschreibung der Vorgänge, die bei der Auslösung von Sekundärelektronen durch Primärelektronen stattfinden, so lassen sich immerhin einige theoretische Aussagen treffen. Im Gegensatz zur lichtelektrischen und zur glühelektrischen Emission spielt für die Sekundäremission die Austrittsarbeit ebenso wie die Temperaturenergie nur eine untergeordnete Rolle. Die Elektronen nehmen beim Stoß mit den Primärelektronen eine große Energie auf. Hingegen darf, wie im Falle des lichtelektrischen Effektes, die Wechselwirkung nur mit gebundenen Elektronen erfolgen, um die Gültigkeit des Energie- und des Impulserhaltungssatzes zu gewährleisten. Letztere Voraussetzung muß zur Erklärung des glühelektrischen Effektes nicht angenommen werden. Die Tatsache, daß die Sekundärelektronen auch auf der Eintrittsseite der Primärelektronen austreten können, schließt ebenfalls aus, daß die Zusammenstöße zwischen Primärelektronen und freien Elektronen erfolgen. Nach

§ 2. Sekundäremission

quantenmechanischen Gedankengängen nimmt beim wahrscheinlichsten Übergang ein Gitterelektron die Energie

$$E_0 = \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{2\pi}{d} \right)^2 \quad (48)$$

vom Primärelektron auf¹⁷), wenn d die Gitterkonstante eines kubischen Gitters bedeutet. Damit überhaupt eine Emission zustande kommt, muß die Energie des Primärelektrons

$$\varepsilon e_p > E_0 - \varepsilon \varphi \quad (49)$$

sein. Die Theorie vernachlässigt jedoch dabei, daß ein Primärelektron, wie aus Schrotteffektmessungen geschlossen werden kann, mehrere Elektronen auszulösen vermag. Darüber hinaus finden die Absorptionsverhältnisse der Sekundärelektronen noch nicht gebührende Berücksichtigung, so daß von einer vollständigen theoretischen Erfassung des Sekundäremissionsvorganges nicht gesprochen werden kann.

b) Energieverteilung der Sekundärelektronen

Experimentell ergibt sich, daß Elektronenemission beobachtet wird, wenn Primärelektronen, deren Energie größer als etwa 10 Elektronen-

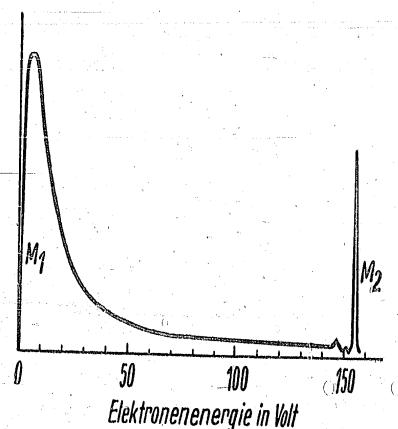


Abb. 15. Energieverteilung der Sekundärelektronen.

volt ist, auf den Körper auftreffen. Die mittlere Energie der dann austretenden Sekundärelektronen beträgt nur einige Elektronenvolt und ist nahezu unabhängig von der Primärelektronenenergie. Abb. 15

soll die Verhältnisse klarstellen. Das Maximum M_1 wird von den eigentlichen Sekundärelektronen gebildet, M_2 dagegen von den mit Primärenergie austretenden, elastisch reflektierten Elektronen. Den Bereich zwischen M_1 und M_2 füllen im wesentlichen die rückdiffundierenden Elektronen aus, die durch mehrfache Streuung an Metallatomen Energieverluste erlitten haben.

e) Sekundäremissionsfaktor

Nach der Identifizierung der Elektronen, die nach dem Auftreffen eines Primärelektronenstrahles aus dem Metall austreten, ist das Einführen eines Quotienten S/P , der als Sekundäremissionskoeffizient bezeichnet wird, zweckmäßig:

$$\delta = S/P. \quad (50)$$

S stellt die Zahl der gesamten austretenden Elektronen, also die totale Sekundärstrahlung dar und P die Zahl der eingeschossenen Elektronen. Berücksichtigt man, daß die mit Sicherheit abzutrennenden elastisch reflektierten Elektronen mit wachsender Primärenergie abnehmen, so stellt δ ein brauchbares und charakteristisches Maß für das Sekundäremissionsvermögen eines Körpers dar.

§ 3. Feldemission

Wird mit steigender Feldstärke die Austrittsarbeit gesenkt, so muß die Potentialschwelle niedriger und dünner und daher auch die Zahl der den Potentialberg durchsetzenden Elektronen größer werden. Die erhöhte Emission, die also ihre Erklärung durch den wellenmechanischen Tunneleffekt (Tunneleffekt vgl. II, § 5c) findet, wird als Feldemission bezeichnet.

Nach der wellenmechanischen Theorie errechnet sich der Feldemissionsstrom i_f zu

$$i_f = 6,2 \times 10^{-6} f \frac{E_i^{1/2}}{(E_i + \varphi)^{1/2}} F^2 e^{-0,8 \times 10^7 \frac{\varphi^{3/2}}{F}} \quad (51)$$

in Amp/cm², wenn φ in Volt und F in Volt/cm eingesetzt wird¹⁸. f stellt die emittierende Fläche dar. Die Gleichung (51) hat demnach die Form

$$i_f = A_F F^2 e^{-\frac{\varphi}{F}} \quad (52)$$

und läßt erkennen, daß der Feldemissionsstrom i_f in gleicher Weise von der Feldstärke abhängt wie der Glühemissionsstrom von der Temperatur der Kathode [Gleichung (42)] bzw. der lichtelektrische Gesamtstrom von der Temperatur des Strahlers [Gleichung (16a)]. Praktisch erweist sich, daß der Feldemissionsstrom immer größer ist, als sich aus den Gleichungen (51) oder (52) errechnen läßt. Der Grund liegt darin, daß durch die unkontrollierbaren Oberflächenrauhigkeiten die wahren Feldstärken an den zahlenmäßig überwiegenden Stellen wesentlich größer sind als die aus den Abmessungen errechneten.

IV. Abschnitt

Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektrischen Effekt

§ 1. Spektrale Verteilung und langwellige Grenze

a) Spektrale Verteilungskurve, normaler und selektiver Photoeffekt

Unter der spektralen Verteilung $V(\lambda)$ wird die Abhängigkeit des Photostromes, bezogen auf die Einheit auffallender, einfallender oder absorbiert Lichtenergie, von der Wellenlänge des Lichtes verstanden. An Stelle der Abhängigkeit von der Wellenlänge kann auch die Abhängigkeit $V(\nu)$ von der Frequenz des Lichtes gewählt werden. Der Vorteil, die Frequenz als Abszisse zu nehmen, liegt vornehmlich darin, daß dann sofort die Energie der Elektronen abgelesen werden kann. In den meisten Fällen ist die auffallende Lichtenergie bekannt, so daß auf diese bezogen wird. Die Umrechnung von auffallender Energie in einfallende setzt die Kenntnis der Reflexionsverhältnisse der emittierenden Schicht voraus. Wird bei nicht zu dünnen Schichten die einfallende Energie vollständig absorbiert, so kann der Photostrom

auf die Einheit absorbiert Lichtenergie bezogen werden.

Man unterscheidet für den äußeren lichtelektrischen Effekt den normalen und den selektiven Photoeffekt. Beim normalen lichtelektrischen Effekt steigt die spektrale Verteilungskurve, bezogen auf absorbierte Energie, von

der langwellige Grenze beginnend, nach kurzen Wellenlängen zu monoton an, während beim selektiven Effekt die Verteilungskurve ein oder mehrere selektive

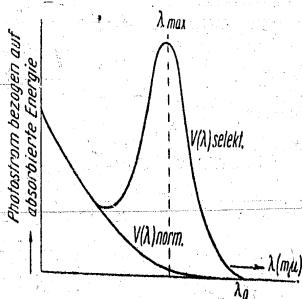


Abb. 16. Normaler und selektiver Photoeffekt.

ginnend, nach kurzen Wellenlängen zu monoton an, während beim selektiven Effekt die Verteilungskurve ein oder mehrere selektive

§ 1. Spektrale Verteilung und langwellige Grenze 39

Maxima aufweisen kann (vgl. Abb. 16). Bezieht man auf einfallende Energie, so weist die normale Verteilungskurve Maxima an den Stellen auf, wo auch der optische Absorptionskoeffizient des Metalls größte Werte besitzt. Die Tatsache, daß nach kürzeren Wellenlängen zu der Photostrom ansteigt, steht im Widerspruch zum Quantenequivalenzgesetz, welches ein Abfallen des Photostromes nach kurzen Wellenlängen fordert.

b) Bestimmung von λ_0 durch Eingabeitung

Während die Messung der spektralen Verteilung mit Hilfe von Monochromatoren oder Filtern (zweckmäßig Monochromatfiltern) experimentell keine besonderen Schwierigkeiten bietet, falls nicht im extremen UV (SCHUMANN-Gebiet) gearbeitet werden muß und außerdem keine zahlreichen Versuchsvariationen zuläßt, sind für die Bestimmung der langwelligen Grenze λ_0 mehrere Wege offen, wobei die Genauigkeiten, die die verschiedenen Methoden ergeben, wesentlich voneinander verschieden sind.

Als älteste Methode kann die Bestimmung von λ_0 durch Eingabeitung angesehen werden. Man sucht, ohne daß eine Energiebestimmung notwendig ist, diejenige Wellenlänge, die gerade noch eine lichtelektrische Wirkung erkennen läßt, und diejenige, die mit Sicherheit keine Elektronen mehr auszulösen vermag. Dazwischen liegt λ_0 . Als besondere Fehlerquelle erweist sich das Vorhandensein von kurzwelligem Streulicht.

c) Bestimmung von λ_0 aus der spektralen Verteilung

In einfacher Weise läßt sich λ_0 auch aus der spektralen Verteilung bestimmen. Man mißt für eine Anzahl von Wellenlängen in der Nähe der langwelligen Grenze den Photostrom, bezogen auf gleiche einfallende Intensität, und extrapoliert die erhaltene Kurve auf verschwindenden Elektronenstrom. Man sollte dabei als Abszisse zweckmäßig die Frequenz auftragen. Bei dieser Methode geht die Empfindlichkeit der benutzten Meßapparatur entscheidend ein.

d) Bestimmung von λ_0 aus der lichtelektrischen Geraden

Eine genauere Methode beruht auf der Verwendung der Gleichungen (17) und (21), indem für jede Frequenz die maximale Austrittsgeschwindigkeit der Elektronen bestimmt und in Abhängigkeit

40 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

von der Frequenz aufgetragen wird. Die gefundenen Werte liegen auf einer Geraden, die üblicherweise als lichtelektrische Gerade bezeichnet wird. Ihr Schmittpunkt mit der Frequenzachse ergibt unmittelbar ν_0 , ihre Neigung ist durch h festgelegt (vgl. Abb. 18). Notwendig ist die Kenntnis der Kontaktpotentialdifferenz zwischen den Elektroden. Als weitere Forderungen kommen die Einhaltung eines zentralen Feldes, das Fehlen von Streulicht und das Auftreten möglichst großer Elektronenströme hinzu. Die Intensitäten der benutzten Wellenlängen müssen nicht bekannt sein.

e) Bestimmung von λ_0 aus der Gesamtemission

Auch die Gleichung (16) enthält die Grenzfrequenz ν_0 , so daß sich nach entsprechender Umformung ähnlich der RICHARDSONschen Geraden für die Glühemission eine RICHARDSONsche Gerade für die lichtelektrische Emission ergibt, mit deren Hilfe der Wert für ν_0 am absoluten Nullpunkt einfach bestimmt werden kann¹⁹.

Die Bestimmung von λ_0 für Sperrsichtzellen und Zellen mit innerem lichtelektrischen Effekt kann in einfacher Weise nach den Angaben in IV, § 1b und c erfolgen, wobei jedoch besonders darauf zu achten ist, daß sich keine Meßfehler einschleichen, die das Resultat gänzlich verfälschen können. Die Überlegungen in bezug auf die lichtelektrische Gesamtemission haben auch für Zellen der beiden genannten Arten ihre Gültigkeit. Man wird, wenn eine exakte Bestimmung von λ_0 notwendig ist, den Wert von λ_0 zweckmäßig aus der lichtelektrischen Geraden ermitteln.

f) Bestimmung von λ_0 aus glühelektrischen Messungen

Es läßt sich experimentell und theoretisch nachweisen, daß die lichtelektrische Austrittsarbeit φ der Metalle mit der glühelektrisch gemessenen übereinstimmt. Daher kann aus glühelektrischen φ -Bestimmungen die Grenzfrequenz und damit auch λ_0 errechnet werden.

g) Bestimmung von λ_0 aus der FOWLERSchen Gleichung

Einen scharf definierten Wert für die Grenzfrequenz ν_0 bei der Temperatur $T = 0^\circ K$ liefert indessen nach geeigneter Auswertung die FOWLERSche Gleichung (25). Man trägt zunächst die Funktion $f_2(\alpha)$ über α auf. Sodann wird bei konstanter Temperatur T für eine Reihe von Frequenzen nahe der Grenzfrequenz der Photostrom i eines Me-

§2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

41

tals, bezogen auf Einheiten einfallender Energie, gemessen und der gebildete $\log i/T^2$ als Funktion von α aufgetragen. Wie Abb. 17 erkennen läßt, kann die experimentelle Kurve durch Parallelverschiebung in die theoretische Kurve übergeführt werden. Die Komponenten der Verschiebung sind C_2 und

$h\nu_0/kT$, woraus ν_0 leicht bestimmbar ist. Die Vorzüge der FOWLERSchen Theorie sind, daß die scharf definierte Grenzfrequenz bei Zimmertemperatur bestimmt werden

kann und daß die bei Temperaturänderung festgestellte Verschiebung der langwelligen Grenze durch das Anwachsen der thermischen Energie der Elektronen erklärt wird. Bemerkenswert ist weiter, daß die Gültigkeit der FOWLERSchen Gleichung nicht für reine, sondern auch für nichtentgaste Metalle nachgewiesen werden konnte. Ähnliche Bestimmungen der langwelligen Grenze in Fortführung der FOWLERSchen Überlegungen führten DU BRIDGE und BLOCHINZEW²⁰ durch.

h) Bedeutung von λ_0 für die Anwendung

Für die technische Anwendung der Photozellen genügt im allgemeinen eine relativ ungenaue Angabe der langwelligen Grenze, weil es in den meisten Fällen möglich sein wird, eine Zelle auszuwählen, die im gewünschten Spektralbereich genügend große Photoströme aufweist. Man ist daher auf den äußersten Ausläufer der spektralen Verteilung nur sehr selten angewiesen. Der Vorteil in der Anwendung des äußeren lichtelektrischen Effektes beruht zu einem großen Teil gerade darin, daß vom nahen Ultrarot bis zum äußersten Ultraviolet die spektrale Verteilung beliebig gewählt werden kann.

§ 2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

Um die Eigenschaften des äußeren lichtelektrischen Effektes an reinen Metallen klarzustellen, muß den Betrachtungen eine Festsetzung über die Dicke der Metallkathoden vorausgeschickt werden. Zunächst

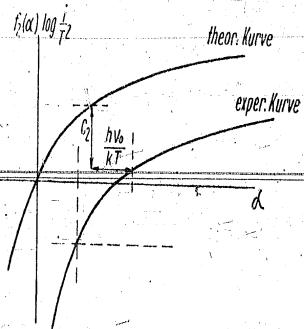


Abb. 17. FOWLERSche Kurve.

42 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

werden Kathoden behandelt, die aus massivem Metall oder aus Metallschichten bestehen, deren Dicke gerade noch ein dem massiven Metall gleiches Verhalten gewährleistet (kompakte Metalle). Die Forderung in bezug auf Metallschichten, die die genannte Bedingung erfüllen, ist normalerweise dann gegeben, wenn die Schicht aus Mikrokristallen mit mindestens 10^5 Atomen besteht und wenn die gleiche Gitterkonstante wie bei dem massiven Metall gemessen wird. Sodann folgt die Betrachtung von metallischen Schichten, die so dünn sind, daß eine Ähnlichkeit mit dem Aufbau des massiven Metalls nicht mehr angenommen werden kann (dünne Schichten).

a) Volumen- und Oberflächenphotoeffekt

Wellenmechanische Betrachtungen²¹⁾ an kompakten Metallen führen zur Unterscheidung des Volumenphotoeffektes vom Oberflächenphotoeffekt. Rein geometrisch wird man bis zu einer Schichttiefe von etwa 10^{-7} cm von einem Oberflächeneffekt sprechen können.

Es werde Licht einer Frequenz ν , die einem Absorptionsband entspricht, in das Metall eingestrahlt. Dann werden Elektronen aus dem Energiezustand E in einen solchen der Energie $E + h\nu$ gehoben. Die Elektronen tieferer Schichten (Volumenphotoeffekt) treten dann aus, wenn der Endzustand der Energie über der Austrittsschwelle liegt. Im allgemeinen stimmt die Grenzfrequenz des Volumeneffektes ν_0 nicht mit der durch Gleichung (18) definierten Grenzfrequenz überein, sondern besitzt größere Werte.

Der Oberflächenphotoeffekt im Gegensatz zum Volumenphotoeffekt spricht nur auf den senkrecht zur Oberfläche schwingenden Lichtvektor an. Denkt man sich die Elektronen in einem Volumen, welches durch zwei, im Abstand der dem Oberflächeneffekt entsprechenden Flächen begrenzt ist und von denen die eine die Oberfläche selbst darstellt, so kann nachgewiesen werden, daß nur Licht zur Absorption gelangen kann, dessen elektrischer Vektor senkrecht zur Oberfläche schwingt. Die Oberfläche sorgt für das Einhalten des Impulssatzes, so daß eine Emission erfolgen kann. Für Licht mit dem elektrischen Vektor parallel zur Oberfläche verhalten sich die Elektronen wie freie Elektronen. Die Grenzfrequenz des Oberflächenphotoeffektes wird durch die Austrittsarbeit φ festgelegt und entspricht der

§2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

43

aus Gleichung (18) erhaltenen Frequenz ν_0 , denn jeder Zustand kann jedes beliebige $h\nu$ absorbieren.

Die Gesamtemission setzt sich additiv aus Oberflächen- und Volumenphotoeffekt zusammen. Nahe der Grenzfrequenz wird wegen $\nu_0 \gg \nu$ der Oberflächenphotoeffekt vorherrschen. Zur Prüfung der Theorie eignen sich insbesondere die Alkalimetalle, bei denen der Volumeneffekt sehr klein und der Oberflächeneffekt der Messung besonders gut zugänglich ist. Die Verhältnisse gestalten sich unübersichtlicher, wenn nicht mit ebenen Oberflächen, sondern mit solchen atomarer Rauigkeit gerechnet werden muß. Welchen Umfang der Einfluß des Polarisationszustandes des Lichts auf die Größe des Oberflächeneffektes annimmt, wenn die Oberfläche nicht als eben angesprochen werden kann, hängt naturgemäß von der Materiewellenlänge der austretenden Elektronen ab. Erfolgt die Auslösung der Elektronen durch langwelliges Licht, so resultieren daraus Elektronen geringer Geschwindigkeit mit großer Materiewellenlänge. Sind nun die Materiewellenlängen der Elektronen groß gegen die Oberflächenrauhigkeiten, so ist in bezug auf die Materiewellenlänge der Elektronen diese Oberfläche als eben anzusehen, und daraus ergibt sich ein Überwiegen des Oberflächeneffektes [Beispiel: Alkalimetalle, vgl. z. B. ²²⁾]. Bei Schwermetallen geschieht das Ablösen der Elektronen durch kurzwelliges Licht, woraus folgt, daß die abgelösten Elektronen größere Geschwindigkeiten besitzen müssen, und wegen der sich daraus ergebenden kleinen Elektronenwellenlängen, die auch klein gegen die Oberflächenrauhigkeiten sind, überwiegt der Volumeneffekt.

In einem gewissen Zusammenhang mit dem Volumen- und Oberflächenphotoeffekt steht vermutlich der von MARX²³⁾ gefundene Effekt (auch als „falling off“-Effekt bezeichnet), wonach das Grenzpotential beim Auffall von zwei verschiedenen Lichtfrequenzen auf eine isolierte Metallelektrode nicht allein durch das Licht der höheren Frequenz, sondern auch durch das der niederen Frequenz bestimmt ist. Die Austrittsarbeit ist mit einem Faktor

$$\frac{J_2 \nu_1 \nu_2 (\nu_1 - \nu_2) h/e}{J_1 - b J_2}$$

zu verändern, wobei ν_1 und ν_2 die beiden Frequenzen und J_1 und J_2 deren Intensitäten bedeuten. MARX erklärt den Effekt so, daß die im

46 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

für die (100)-Flächen 4,81 Volt, während sich für die (111)-Flächen 4,75 Volt ergibt. Die Fehler liegen in der Größenordnung 0,01 Volt²⁵). Kubisch flächenzentriertes Co besitzt eine Austrittsarbeit von 4,25 Volt, hingegen hexagonales Co eine solche von 4,12 Volt²⁶). Die genauere theoretische Betrachtung der Abhängigkeit der Austrittsarbeit von der Orientierung der Kristalle hat neuerdings zu einer vertieften Kenntnis der Doppelschicht an Metalloberflächen geführt²⁷).

D. Ausbaute

Auch die Ausbeute (gemessen in Coul/mol, vgl. Abb. 19, oder in Elektronen/Quant, vgl. Abb. 20) erweist sich als abhängig von der Stellung

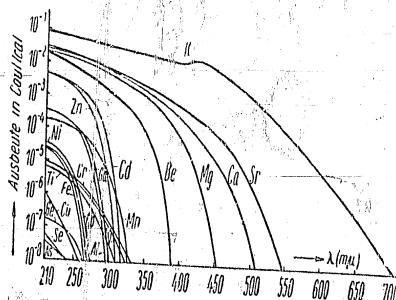


Abb. 19. Spektrale Verteilungen von Metallen.

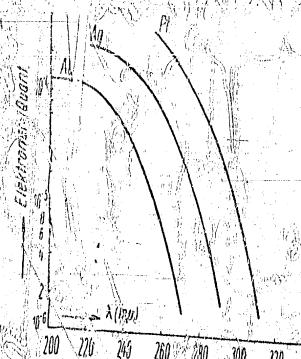


Abb. 20. Ausbeuten in Elektronen/Quant für Au, Ag und Pt

des Metalls im periodischen System. Die Metalle gleicher Gruppen ergeben eine Ansammlung in der gleichen Größenordnung^{23). Die speziellen Verhältnisse verlaufen normal. Nur bei den Erdalkali- und Al-}

§ 2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

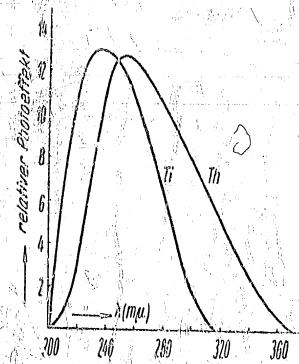
47

kalimetallen lassen sich Selektivitäten sehr schwer unterdrücken^{20).} In vollkommen entgastem Zustand, wenn also reine Erdalkali- oder Alkalimetalle vorliegen, wird auch bei diesen Metallen der normale Photoeffekt gemessen.

e) UV-Zellen

Für technische Zwecke wird der Zellenkörper gewöhnlich aus UV-durchlässigem Glas hergestellt. Bei sehr kurzen Wellen (etwa unterhalb 250 μm) geht die immer größere Absorption des Zellengefäßes in die spektrale Verteilung stark ein. Beispiele hierfür sind in den Abb. 21 und 22 ausgewählt. Für die Auswahl galt gleichzeitig der Gesichtspunkt, daß die Photokathode im sichtbaren Spektralbereich keine Empfindlichkeit zeigen soll. Viele UV-Messungen lassen sich dadurch überhaupt erst ermöglichen. Die Herstellung eines Filters, welches das UV durchläßt, hingegen das Sichtbare hindert, absorbiert, dürfte auch in der nahen Zukunft Schwierigkeiten bereiten, so daß lediglich durch die Wahl der richtigen Kathode die an die Photozelle gestellte Bedingung, im UV, hingegen nicht im sichtbaren Licht empfindlich zu sein, Erfüllung finden kann.

Bei der Verwendung serienmäßig hergestellter Zellen muß beachtet werden, daß Schwankungen der langwelligen Grenze zwischen Zellen der gleichen Bauart in der Größe von etwa $\pm 5 \mu$ auftreten können, wie am Beispiel zweier Cd-Zellen (Abb. 22) gezeigt wird. Die Folge dieser ungleichen langwelligen Grenzen ist



b. 21. Verteilungen technischer Zellen zeit Abhängen aus Th und Ti.

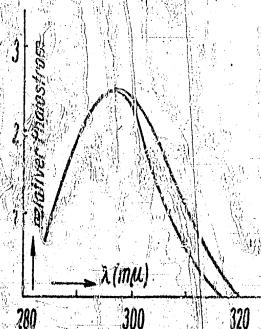


Abb. 22. Spektrale Verteilungen
technischer Cd-Zellen.

48. Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

ein unterschiedlicher Verlauf der spektralen Verteilung, woraus sich eine verschiedene integrale Empfindlichkeit ergibt, der für alle Messungen, bei denen zwei gleiche Zellen notwendig sind, Rechnung getragen werden muß.

f) Einfluß der Temperatur auf die integrale Empfindlichkeit

Geringe Differenzen der integralen Empfindlichkeit ergeben sich auch, wenn während der Messungen verschiedene Temperaturen herrschen. Abb. 23 soll eine Vorstellung von der Größe des Effektes geben.

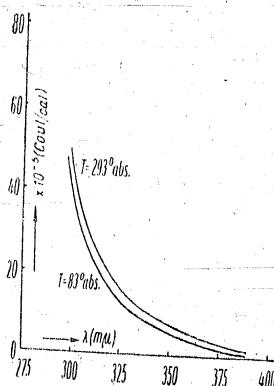


Abb. 23. Temperatureinfluß auf die spektrale Verteilung einer Be-Kathode.

Temperatur an allen bisher untersuchten reinen Metallen bestätigt worden (Mo, Mg, Be, Na, Au, Ag, Pd, W, Bi, Al, Ta und Ti).

g) Einfluß der Gasbeladung

Bezieht man in die Betrachtung auch die nichtentgasten Metalle ein, so kann man feststellen, daß sowohl die langwellige Grenze als auch die lichtelektrische Ausbeute vom Gasgehalt des Metalls wesentlich abhängen. Die starken Streuungen der in Tab. 3 angegebenen Werte sind zum Teil auf nicht vollkommene Entgasung zurückzuführen. Der Nachweis dafür, daß die Gasbeladung die lichtelektrischen Daten eines Metalls entscheidend beeinflußt, kann an kompakten Metallen dadurch erbracht werden, daß man entweder die Metallocberfläche abschält oder abträgt oder aber das Metall einer Temperaturbehandlung unterwirft, und an Aufdampfschichten in der

§ 2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

49

Weise, daß die sorgfältig gasfrei auf die ebenfalls gasfreien Unterlagen aufgebrachten Schichten nachträglich der Gasatmosphäre ausgesetzt werden, deren Einwirkung auf den lichtelektrischen Effekt studiert werden soll³¹⁾. In den überwiegendsten Fällen kann folgender Gang der langwelligen Grenze mit dem Entgasungszustand beobachtet werden. Mit zunehmender Entgasung wandert die langwellige Grenze zunächst nach längeren Wellen. Der maximale Wert der langwelligen Grenze fällt in den meisten Fällen mit einer beendeten Oberflächenentgasung zusammen. Bei weiterer Entgasung, der sogenannten Innenentgasung, wandert die Grenzwellenlänge wieder zurück, um schließlich bei vollständiger Entgasung einen konstanten Wert anzunehmen³²⁾. Eine zeitlich besonders kurze Entgasung wird im allgemeinen durch intermittierende, intensive Glühung erreicht, wenn das Material, beispielsweise für wissenschaftliche Untersuchungen, in Drahtform als Kathode benutzt werden kann.

Als Ausnahme vom obigen allgemeineren Fall sei ein Beispiel herangezogen. Von entgastem Cd ausgehend kann man zeigen³³⁾, daß Wasserdampf sensibilisierende Wirkung besitzt, d. h. die Ausbeute steigt und die Grenzwellenlänge nach längeren Wellen verschiebt, während ein Beladen mit Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlensäure und Argon eine Verringerung des lichtelektrischen Effektes an Cd hervorruft, also im Sinne des im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Verlaufs wirkt. Ein weiteres Beispiel soll beweisen, daß auf den ersten Blick die Wirkung einer Gasbeladung nicht immer klar erkennbar ist. Nicht entgastes Al wird in einer Wasserstoffglimentladung sensibilisiert³⁴⁾. Man hätte den umgekehrten Effekt oder wenigstens keine Beeinflussung erwartet. Offenbar wird aber durch die Glimentladung die Al-Oberfläche von der Oxydschicht befreit. Auf frisch aufgedampfte und daher höchstens schwach mit Gas beladene Al-Schichten hat die Glimentladung nur geringen Einfluß.

h) Beeinflussung des Funkenausbruchs durch UV-Belichtung

Eine besondere Bedeutung kann für technische Zwecke in Zukunft die Beeinflussung des Funkenausbruchs bei hochfrequenter Wechselspannung durch ultraviolette Bestrahlung der Metallelektronen gewinnen. Schon HERTZ und HALLWACHS³⁵⁾ zeigten mit ihren klassischen

Görlich, Die lichtelektrischen Zellen

50 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

Versuchen, die übrigens Ausgangspunkt für alle Untersuchungen des äußeren lichtelektrischen Effektes wurden, daß die Bestrahlung einer Funkenstrecke mit UV spannungssenkende Wirkung hat. Später ist dann auch von einer spannungserhöhenden Wirkung berichtet worden. Genaue Untersuchungen haben ergeben³⁸⁾, daß die spannungssenkende Wirkung bei kleinen Schlagweiten unterhalb der TOEPLERSchen Knickstelle auftritt, die spannungserhöhende hingegen bei größeren Schlagweiten. Die lichtelektrisch ausgelösten Elektronen sind bei großen Schlagweiten nicht imstande, das Feld im Schlagraum so zu beeinflussen, daß eine Spannungserhöhung der gemessenen Größe auftritt; die Erklärung für die spannungserhöhende Wirkung ist vielmehr darin zu suchen, daß die Elektronen nur in der Lage sind, die Ausbildung negativer, das Feld verzerrender Leuchtfäden und Streifen zu beeinflussen. Es muß, wenn die ultraviolette Belichtung zu einer spannungserhöhenden Wirkung führt, eine Sperrwirkung auftreten, deren technische Anwendung bisher wohl nur deshalb unterblieb, weil die Zeit, die zum Umbau des Feldes notwendig ist, in der Größenordnung von Sekunden liegt. Ein genaueres Studium der Bedingungen für den Umbau des Feldes dürfte zu einem brauchbaren Gleichrichter für hohe Spannungen führen.

i) Dünne Schichten

Ein grundsätzlich anderes Verhalten in bezug auf ihre lichtelektrischen Eigenschaften können dünne Schichten aufweisen. Strengeommen dürften in diesem Abschnitt nur „freischwebende Schichten“ behandelt werden, denn falls man unter „dünne Schichten“ solche versteht, bei denen Ähnlichkeit mit dem massiven Metall nicht mehr angenommen werden kann, muß der Einfluß der Unterlage Berücksichtigung finden.

Dünne Schichten werden entweder durch Aufdampfen, durch Aufstäuben oder auch durch Abstäuben dickerer Schichten erzielt. Die Struktur dünner Schichten hängt außer von der Unterlage auch noch von der Geschwindigkeit des Aufdampf- bzw. Aufstäubprozesses ab. Selbst der Grad der Gasbeladung der Unterlage kann für die Bildung einer kristallinen oder nichtkristallinen Struktur der dünnen Schicht von Bedeutung sein. Es ergeben sich daher oft unterschiedliche Resultate,

§ 2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

51

die nur dann auf einen Nenner zu bringen sind, wenn die Vorgeschichte der untersuchten Schicht genügend genau bekannt ist.

Äußerst bemerkenswert in diesem Zusammenhange ist ein Befund, nach dem kathodisch aufgestäubte Antimonschichten im instabilen Zustand sehr kleine Austrittsarbeiten für Photoelektronen besitzen. Sofort nach der Herstellung der Schicht beträgt die Austrittsarbeit $\varphi \approx 0,2 \text{ eV}$ und steigt zunächst schnell (in 2 Std. auf $\approx 2 \text{ eV}$), um schließlich nach ≈ 40 Std. einen Endwert ($\approx 4,2 \text{ eV}$) zu erreichen³⁷⁾.

k) Freischwebende Schichten

Wegen der besonderen Wichtigkeit, die dünnen Schichten elektro-positiver Metalle auf Metallunterlagen zukommt, sollen zunächst nur dünne Schichten auf nichtleitenden Unterlagen, wie Glas oder Quarz, und freischwebende Schichten betrachtet werden, während die ersten in einem besonderen Abschnitt besprochen werden. Vom wissenschaftlichen Standpunkt interessieren die freischwebenden Schichten deshalb besonders stark, weil bei ihnen der Absorptionskoeffizient sowohl des Lichts als auch der der ausgelösten Elektronen berechenbar ist, ohne daß die Fehler durch besondere Rechnung zu berücksichtigen sind, die sich bei der Auswertung der optischen Meßergebnisse an dünnen, auf Glas oder Quarz niedergeschlagenen Schichten ergeben müssen. Fehler, die durch Mitwirkung der Unterlage auftreten und kaum exakt erfaßbar sind, sind bei Messungen freischwebender Schichten in gleichem Maße wie bei Unterlageschichten nicht zu befürchten, obwohl die freitragenden Schichten in der Weise hergestellt werden, daß man die dünnen Schichten zunächst auf eine Unterlage, wie Steinsalz oder Häutchen aus Zelluloseazetat, aufbringt und die Unterlage ablöst. Kennt man den Absorptionskoeffizienten des Lichts und den der Elektronen, so darf erhofft werden, daß man zu einem tieferen Verständnis des lichtelektrischen Primärvorganges vordringt. Die mathematische Behandlung der Lichtabsorptions- und der lichtelektrischen Verhältnisse führt zu folgendem Resultat³⁸⁾. Die Reflexion errechnet sich aus Gleichung

$$R = C \frac{e^\beta - e^{-\beta} + 4 \sin^2 a}{(e^\beta - C e^{-\beta})^2 + 4 C \sin^2(a + \gamma)} \quad (54)$$

52 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

und die Durchlässigkeit aus Gleichung

$$D = e^{-\frac{4\pi k d}{\lambda}} \frac{(1-C)^2 + 4C \sin^2 \psi}{1 - Ce^{-\beta} + 4C e^{-\beta} \sin^2(\alpha + \psi)}, \quad (55)$$

wenn

$$C = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad \alpha = \frac{2\pi n d}{\lambda}, \quad \beta = \frac{2\pi k d}{\lambda}, \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{2k}{n^2 + k^2 - 1},$$

n der Brechungsexponent, d die Schichtdicke und k der Extinktionskoeffizient bedeuten. Die Zahl der aus der Schicht austretenden Elektronen ergibt sich zu

$$N = \frac{N_0 O_{\text{inh}}}{2} \Phi_0 \left(\frac{e^{-ad} e^{-bd}}{b-a} + \frac{1 - e^{-d(a+b)}}{a+b} \right). \quad (56)$$

N_0 ist die Zahl der pro Zeit- und Volumeneinheit durch die Einheit der Lichtintensität im Schichtinnern abgelösten Elektronen, O_{inh} der Oberflächeninhalt der Schicht, Φ_0 die einfallende Lichtintensität, a der Absorptionskoeffizient des Lichts und b der Absorptionskoeffizient der Elektronen.

1) Dünne Alkalischichten auf nichtleitender Unterlage

Eine Ausnahmestellung in ihrem lichtelektrischen Verhalten zeigen in besonderem Maße dünne Alkalischichten auf einer nichtleitenden Unterlage wie Quarzglas. Wenn besondere Voraussetzungen erfüllt sind, etwa feine Verteilung, Adsorption u. ä., wenn also keinesfalls Bedingungen vorliegen, die auf Ähnlichkeit mit dem massiven Metall hinweisen, tritt ein selektiver Photoeffekt auf³⁹⁾. GUDDEN und POHL geben eine rein optische Deutung des Effektes, nach der das optische Absorptionsspektrum adsorbiert Alkaliatome bzw. Moleküle auf elektrischem Wege gemessen werde. Diese Deutung veranlaßte dazu, nachzuforschen, ob oberflächliche Alkalischichten eine selektive Absorptionsbande in dem bewußten Spektralgebiet haben. Die Lichtabsorption darf nur dann auftreten, wenn der elektrische Vektor des Lichts senkrecht zur Oberfläche, also parallel zur Einfallsebene, schwingt. In der Tat ist es gelungen, eine selektive vektorabhängige Lichtabsorption im richtigen Spektralbereich zu finden⁴⁰⁾. Daß die Absorption vektorabhängig sein muß, ist leicht einzusehen, wenn man bedenkt, daß adsorbierte Atome ein anisotropes System bilden, in welchem die Einwirkung des Lichts auf die Atome unsymmetrisch erfolgt.

§ 2. Reine Metalle als Kathodenmaterial

53

m) Herstellung von Metallkathoden

Die Anwendung von Photozellen mit reinen metallischen Kathoden erstreckt sich fast ausschließlich auf das Gebiet der Messung ultravioletten Lichts. Für den sichtbaren und ultraroten Spektralbereich sind die modernen zusammengesetzten Kathoden (vgl. IV, § 4) wegen ihrer ungleich größeren Empfindlichkeiten vorzuziehen. Seltener verwendet man massive Metallkathoden, und zwar eigentlich nur dann, wenn es nicht möglich ist, die Kathoden weder durch Aufdampfen noch durch Eindestillieren des Metalls herzustellen. Um eine möglichst gleichmäßige Fertigung zu erzielen, müssen sowohl die massiven Kathoden (etwa durch Wirbelstromerhitzung) als auch die Zellengefäße (beispielsweise mittels Heizöfen) genügend entgast werden. Gleichmäßige Ergebnisse, wenigstens in bezug auf die Empfindlichkeit, sind zu erhalten, wenn man die Schichten durch Aufdampfen aus Heizwendeln, durch Kathodenzerstäubung oder durch Eindestillieren des lichtempfindlichen Metalls erzeugt. Als Unterlagen können entweder die Zellengehäuse selbst (Glas oder Quarz), oder aber massive Ag- bzw. Cu-Bleche sowie Spaltflächen von Steinsalzkristallen oder Glimmer dienen. Die besonderen Erscheinungen, die beim Aufbringen dünner Alkalischichten auf eine Metallunterlage auftreten, sind erst im folgenden Abschnitt IV, § 3 behandelt.

Die Herstellung von Schichten durch Elektrolyse aus Lösungen innerhalb der Zellen gibt in den meisten Fällen keine befriedigenden Ergebnisse, ebensowenig wie die Herstellung durch chemisches Niederschlagen des lichtempfindlichen Metalls, obwohl sich letzteres Verfahren (chemisches Niederschlagen von Ag) bei Einhaltung bestimmter Vorsichtsmaßregeln bewährt hat, wenn man die niedergeschlagenen Schichten nur als Unterlage für zusammengesetzte Kathoden (IV, § 4) verwendet. Amorphe Schichten im Sinne von KRAMER⁴¹⁾ scheinen sich am zweckmäßigsten durch Kathodenzerstäubung herstellen zu lassen, wobei zu beachten ist, daß tiefgekühlte Unterlagen Verwendung finden müssen und als Füllgas nur reines Edelgas. In letzterer Zeit hat sich immer mehr die Ansicht durchgesetzt⁴²⁾, daß das geeignete Verfahren, um dünne Schichten herzustellen, die thermische Verdampfung darstellt. Sorgt man dafür, daß die thermische Verdampfung im Hochvakuum erfolgt und erst nach gründlicher Entgasung aller Zellen-

54 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

teile, besonders des Schichtträgers und der Verdampfungswendel, so können in der Tat gleichmäßige Resultate erzielt werden. Nicht genügende Vorentgasung hat zur Folge, daß sich auf der Schicht Restgase niederschlagen, um so eher, je tiefer die Unterlage beim Aufdampfprozeß gekühlt wird.

Von den verschiedenen möglichen Verfahren⁴³⁾, Alkalimetallschichten herzustellen, hat sich das Eindestillieren am besten bewährt. Das Alkalimetall wird in einer Vorlage außerhalb der Zelle entwickelt und darauf entsprechend seiner Reinheit in einer oder mehreren Stufen in die Zelle eindestilliert. Es hat sich auch als vorteilhaft herausgestellt, das Alkalimetall sauber in Ampullen zu destillieren, diese mit Trümmerventilen zu versehen und bei der Herstellung an jede Photozelle eine Ampulle anzusetzen. Zur Entwicklung des Alkalimetalls wählt man solche chemischen Prozesse, bei denen als Endprodukt das Alkalimetall und eine schwer destillierbare Verbindung oder ein Gas, welches leicht abgepumpt werden kann, entsteht. Beispiele sind die Entwicklung des Alkalimetalls aus dem Alkaliazid, aus einem Gemisch des Alkalisulfats, -wolframs, -molybds oder -chromats mit Zr, aus einem Gemisch von Alkalibichromat mit Si oder Al und schließlich bei nicht zu hohen Anforderungen an die Sauberkeit aus einem Gemisch von Alkalihalogeniden mit Ca. In manchen Fällen ist versucht worden, die Reduktion des Alkalimetalls innerhalb der Zelle durchzuführen. Es zeigt sich jedoch, daß jede Spur des Reduktionsmittels im Alkalimetall von vornherein vermieden werden muß (die Möglichkeit des Destillierens entfällt hierbei) und daß sich die Menge, die sich als Schicht niederschlagen soll, schlecht dosieren läßt.

§ 3. Dünne Schichten auf Metallunterlage als Kathoden

a) Verschiebung der langwvigen Grenze mit verändertem Bedeckungsgrad
In II, § 2 wurde bereits erwähnt, daß eine Verminderung der Austrittsarbeit erzielt wird, wenn an Metalloberflächen Ionen oder Atome elektropositiver Metalle adsorbiert werden. Nach Gleichung (19a) muß mit der Verkleinerung der Austrittsarbeit eine Verschiebung der Grenzwellenlänge nach längeren Wellen verbunden sein. In der Tat läßt sich experimentell das Wandern der Grenzwellenlänge mit veränderter Austrittsarbeit beobachten. Von geringen Bedeckungsgraden

§ 3. Dünne Schichten auf Metallunterlage als Kathoden

55

zu größeren nimmt zunächst die Austrittsarbeit φ ab, und demzufolge verlagert sich die Grenzwellenlänge λ_0 zu längeren Wellen. Bei einer optimalen Bedeckung ϑ_{\max} wird die kleinste Austrittsarbeit und damit die am weitesten nach dem Rot zu verschobene Grenze gemessen. Für eine Bedeckung $\vartheta > \vartheta_{\max}$ wird φ wieder größer, und λ_0 wandert nach kürzeren Wellen zurück. Läßt man Alkalimetalle an Metalloberflächen adsorbieren, so kann erreicht werden, daß die langwellige Grenze bis in den ultravioletten Spektralbereich hineinreicht, obwohl die Unterlagsmetalle (etwa Ag, Au, Pt oder Cu) ohne Adsorptionsschicht ihre langwellige Grenze fast ausnahmslos im UV haben⁴⁴⁾.

b) Normaler und selektiver Effekt

Für kleine ϑ (nur Adsorption von Ionen) wird der normale Photoeffekt gemessen, und zwar sowohl für Licht mit einem elektrischen Vektor parallel zur Einfallsebene als auch mit einem elektrischen Vektor senkrecht dazu. Zur Veranschaulichung der Verhältnisse diene das in Abb. 24 wiedergegebene bekannte SUHRMANNsche Beispiel der Adsorption von K an Platinmohr. Während die langwellige Grenze des reinen Platinmohrs bei $\sim 270 \text{ m}\mu$ gemessen wird, verschiebt sie sich bis nach nahezu $500 \text{ m}\mu$, wenn K in feiner Verteilung auf die Unterlage aufgebracht wird. Die spektrale Verteilung verläuft normal.

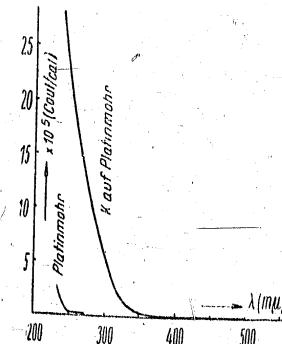


Abb. 24. Normaler Photoeffekt für K auf Platinmohr.

In der Größe des Photostromes machen sich, wie zu erwarten ist, die optischen Eigenschaften des Trägermetalls bemerkbar. Durch Aufdampfen von Ag hergestellte Oberflächen zeigen bei $320 \text{ m}\mu$ ein Reflexionsminimum (vgl. Abb. 25). Demzufolge weist auch die Empfindlichkeitskurve bei der gleichen Wellenlänge eine Einbuchtung auf, wenn die Ag-Oberfläche durch Aufbringen von K für dieses Gebiet lichtempfindlich gemacht wird. In beiden Beispielen (K auf Platinmohr und K auf Ag) ist die Bedeckung noch nicht optimal gewählt⁴⁵⁾.

56 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

Wird der Bedeckungsgrad größer, so tritt eine Adsorption von Atomen ein und damit ein ausgesprochen selektiver lichtelektrischer

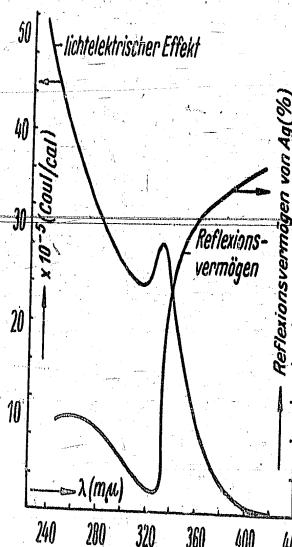


Abb. 25. Spektrale Verteilung von K auf Ag.

maximum offenbar dann erreicht ist, wenn die polarisierende Wirkung der Unterlage nicht mehr überwiegt. Der selektive lichtelektrische Effekt scheint an die Adsorption von Atomen gebunden zu sein. Da nun durch den Einfluß der Unterlage auch noch Atome adsorbiert werden können, wenn die Austrittsarbeit ϑ bereits wieder größer wird, also die für die Austrittsarbeit günstigste Bedeckung ϑ_{\max} überschritten ist, wandert zwar die langwellige Grenze wieder zurück, das Emissionsmaximum muß aber noch nicht unbedingt erreicht sein⁴⁶⁾.

Die Frage nach der Herkunft der ausgelösten Elektronen kann folgende Beantwortung erfahren⁴⁷⁾. Im Falle des selektiven lichtelektrischen Effektes muß angenommen werden, daß die ausgelösten Elektronen Valenzelektronen der adsorbierten Atome sind, während beim normalen Effekt Leitungselektronen des Trägermetalls emittiert werden. Falls Licht einer Frequenz $\nu \approx \nu_0$ eingestrahlt wird, stammen auch noch für größeres ϑ die Elektronen aus der Unterlage.

Ob sich die im vorstehenden wiedergegebenen Deutungen für die Zukunft aufrechterhalten lassen, werden genauere Untersuchungen

ergeben, die die Kristallstruktur des Trägermetalls bei der Adsorption von Fremdmetallen berücksichtigen⁴⁸⁾. Derartige Versuche wurden bisher im wesentlichen auf glühelektrischer Grundlage durchgeführt und ergaben, daß offenbar die Adsorption von Cs und Ba an W allein in Atomform und nicht in Ionenform erfolgt. Man kann für jede Kristallfläche gewisse Auswahlregeln finden, nach denen man voraussagen kann, welche Fremdatome auf einer gegebenen Fläche kondensierte Filme bilden können.

- 100 Der Photostrom wächst also mit größerer Frequenz des einfallenden Lichtes stärker als normal und läuft über ein Maximum, dessen Lage mit der Lichtabsorption der adsorbierten Atome zusammenhängt. Mit wachsendem ϑ nimmt die Gesamtemission unter der Bedingung, daß das eingestrahlte Licht solche Frequenzen enthält, die eine Selektivität hervorrufen können, zu, bis ein Emissions-

§ 4. Zusammengesetzte Kathoden

57

Die Herstellung von lichtelektrischen Kathoden mit Adsorptionsschichten geschieht meist in der Weise, daß man auf die Zellengehäusewand zunächst das Unterlagemetall aufdampft und dann das Alkalimetall in die Zelle eindestilliert. Man kann jedoch auch eine freistehende Metallkathode als Träger für die Adsorptionsschicht wählen. Für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist das Vermeiden von Verunreinigungen wiederum wesentlich⁴⁹⁾, wie auch die Anlagerung der Ionen und Atome von der Gitterstruktur des Trägermetalls abhängt. Nach dem Eindestillieren des Alkalimetalls schließt sich der Formierprozeß an, der bei einer Temperatur vorgenommen wird, bei der überschüssiges Alkalimetall abdampfen kann, sofern nicht von vornherein die richtige Dosierung vorgenommen wurde. Der Formierprozeß ist dann beendet, wenn die lichtelektrische Emission nach anfänglichem Steigen gerade eben Neigung zeigt, wieder abzufallen. Er muß sofort abgebrochen werden, um dem Emissionsmaximum möglichst nahe zu bleiben.

Technische Anwendung finden einfache Kathoden mit Alkaliadsorptionsschichten auf Trägermetall nicht mehr. Höchstens für UV-Messungen dürften sich gewisse noch nicht genügend untersuchte Adsorptionsschichten (Erdalkalimetalle, seltene Erden und Cd) eignen.

§ 4. Zusammengesetzte Kathoden

a) Begriff der zusammengesetzten Kathode

Unter zusammengesetzten Kathoden sollen alle diejenigen Kathoden verstanden werden, bei denen sich die atomaren, die Austrittsarbeit herabsetzenden Schichten nicht direkt auf einer metallischen Unter-

58 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

lage befinden, sondern von dieser durch eine Zwischenschicht getrennt sind. Die Zwischenschicht kann in gewissen Fällen, insbesondere dann, wenn die Querleitfähigkeit hinreichend groß ist, den Transport der nachzuliefernden Elektronen übernehmen, so daß die metallische Unterlage gänzlich in Wegfall kommen kann. Die letzte Tatsache ist

von besonderer Wichtigkeit, wenn die Herstellung durchsichtiger Kathoden gewünscht wird. In einem solchen Fall erfolgt die Beleuchtung der Kathode so, daß das auslösende Licht in Richtung der austretenden Elektronen läuft (vgl. Abb. 26). Man wird also bei durchsichtigen Kathoden jede absorbierende, aber nicht zur Elektronenemission beitragende Schicht, wie es eine metallische Unterlage darstellen würde, vermeiden. Die Folge davon kann allerdings ein gänzlich geändertes Formierverfahren sein. Betrachtet man nämlich den schematischen Aufbau

einer Schicht mit und ohne metallischer Unterlage (vgl. Abb. 27a und b), so erkennt man, daß bei genügend dünner Zwischenschicht noch die Grenzzone zwischen metallischer Unterlage und Zwischenschicht zur Elektronenemission fähig sein kann, so daß die je nach dem gewählten Formierverfahren mehr oder weniger scharf ausgebildete Grenze oder Zone beider Schichten die Größe des Emissionsstromes wesentlich beeinflussen wird⁵⁰.

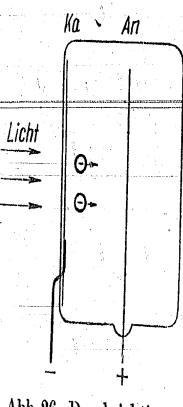


Abb. 26. Durchsichtige Photokathode.

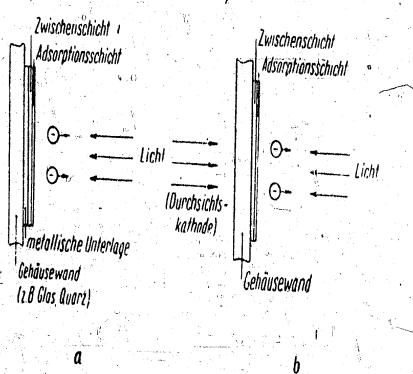


Abb. 27. Zusammengesetzte Kathode mit (a) und ohne (b) metallischer Unterlage.

§4. Zusammengesetzte Kathoden

59

b) Kaliumhydridkathoden

Werden die zusammengesetzten Kathoden in der oben angegebenen Weise definiert, so müssen unter Beibehaltung der historischen Reihenfolge zunächst die ELSTER-GETTELSchen Kaliumhydridkathoden erwähnt werden. Eine solche Kathode entsteht⁵¹), wenn eine K-Hydridschicht auf metallischer Unterlage mit K bedampft wird. Die älteren K-Hydridkathoden besaßen als metallische Unterlage der Hydridschicht eine K-Schicht und wurden in der Weise hergestellt, daß man eine kompakte K-Schicht bis zu einer gewünschten Dicke durch Glimmentladung im Wasserstoff hydrierte. Die Glimmentladung ist notwendig, weil ein bloßes Einwirken molekularen Wasserstoffes keine Hydridbildung zur Folge hat. Eine solche wird nur beobachtet, wenn eine dünne K-Schicht etwa auf Pt oder W dem Wasserstoff, insbesondere dem atomaren Wasserstoff, ausgesetzt wird. Die maximale Empfindlichkeit der so hergestellten Hydridkathoden wird nun nicht sofort erreicht, sondern erst nach Stunden, wenn man nicht vorzieht, durch erneutes Eindestillieren von K auf die gebildete K-Hydridschicht das Maximum der Empfindlichkeit sofort hervorzurufen. Nach den heutigen Anschauungen muß eine K-Hydridkathode, um lichtelektrisch empfindlich zu sein, in der K-Hydridschicht K in feiner Verteilung enthalten und an der Oberfläche zur Herabsetzung der Austrittsarbeit eine atomare K-Schicht besitzen. Das ältere Herstellungsverfahren steht mit diesen Anschauungen nicht im Widerspruch, und Verfahren, die nach den modernen Anschauungen ausgearbeitet sind, führen zu Hydridkathoden maximaler Empfindlichkeit.

Schließt man sich der von DE BOER eingeführten Symbolik an⁵²), nach der die Unterlage in eckige Klammern gesetzt und die Zwischenschicht durch Bindestriiche von der Unterlage und der Adsorptionsschicht getrennt wird, so ergibt sich für die K-Hydridkathode älterer Bauweise die symbolische Bezeichnung [K]–KH, K–K.

Die spektrale Verteilung von K-Hydridkathoden ist in Abb. 28 gezeigt⁵³). Bei $436 \text{ m}\mu$ liegt das für K-Hydridkathoden charakteristische Maximum. Wegen der an der Oberfläche adsorbierten K-Atome tritt ein ausgesprochen selektiver lichtelektrischer Effekt für parallel zur Einfallsebene schwingendes Licht auf. Der Vektor senkrecht dazu ruft den normalen Effekt hervor. Lange Zeit waren die K-Hydridzellen

60 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

trotz ihrer Mängel, die in der Hauptsache in ihrer Inkonsistenz bestehen, die einzige brauchbaren technischen Zellen überhaupt. Nach Herstellung der rotempfindlichen Cs-Kathoden (vgl. folgende Abschnitte) beschränkte sich ihre Anwendung auf das Spektralgebiet

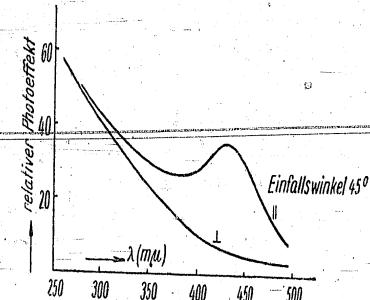


Abb. 28. Spektrale Verteilung einer [K]-KH, K-K-Kathode im polarisierten Licht.

unterhalb 500 m μ . Aber auch hier wurden sie neuerdings durch die neueren Legierungskathoden vollkommen verdrängt. Daran konnten selbst Untersuchungen, die sich mit neuen Sensibilisierungsverfahren befassen und an Stelle des K auch die Metalle der zweiten Gruppe des periodischen Systems in die Untersuchungen einbeziehen, nichts ändern⁵⁴⁾, da für die technische Brauchbarkeit nicht nur die Konstanz der Zellen bestimmt ist, die wohl wesentlich verbessert werden konnte, sondern auch die Empfindlichkeit, deren Vergrößerung nicht gelang. Natürlich besteht wissenschaftliches Interesse für Untersuchungen in dieser Richtung, denn es ist wichtig zu prüfen, wie weit auf den neueren Anschauungen weiter aufgebaut werden kann.

e) Sensibilisierung durch Sauerstoff

Die Möglichkeit einer Sensibilisierung, d. h. die Bildung lichtelektrisch geeigneter Zwischenschichten, ist nicht nur durch Wasserstoff gegeben, sondern auch durch Schwefel, Selen, Tellur, Naphthalin, Anthrazin u. a., besonders jedoch durch Sauerstoff⁵⁵⁾.

Sauerstoff an einer metallischen Unterlage adsorbiert, bildet eine Dipolschicht mit negativer Belegung nach außen. Dadurch muß eine Erhöhung der Austrittsarbeit auftreten. Im Gegensatz zu den Er-

§4. Zusammengesetzte Kathoden

61

kenntnissen, die bei der Adsorption von positiven Ionen an Metalloberflächen gewonnen worden sind, besteht Grund zu der Annahme, daß sich Oxydmoleküle, die ein Dipolmoment besitzen, auf der Metalloberfläche so anordnen, daß die negativen Sauerstoffatome der Moleküle jeweils nach außen angelagert sind⁵⁶⁾.

Läßt man nun positive Metallionen an derartigen oxydierten Metalloberflächen adsorbieren, so zeigt sich, daß eine sehr viel festere Bindung der Ionen erfolgt als an reinen Metalloberflächen. Letztere Methode führt unter Anwendung einer Ag-Unterlage und von Cs zu rotempfindlichen Kathoden, deren Aufbau den symbolischen Bezeichnungen $[Ag]-O$, Cs und für eine dicke Zwischenschicht $[Ag]-Cs_2O-Cs$ entspricht⁵⁷⁾. Die langwelligen Grenzen dieser einfachen Oxydkathoden liegen zwischen 800 und 1100 m μ . Ebenso wie die mit Wasserstoff sensibilisierten Alkalikathoden weisen auch die Alkalioxydkathoden mit dickerer Zwischenschicht selektive Maxima auf, die im Falle der Cs-Oxydkathoden um 620 m μ herum gemessen werden können. Technisch spielen diese Kathoden keine Rolle mehr, da sie in der Gesamtempfindlichkeit sowie in der Ultrarempfindlichkeit weit übertroffen werden können (vgl. folgenden Abschnitt).

d) Moderne Cäsiumoxydkathoden mit Silberunterlage

Die neuere Entwicklung der Cäsiumoxydkathoden ging von der Überlegung aus, daß zur Emission nicht nur die unmittelbare Oberfläche herangezogen werden müsse, sondern daß offenbar auch tiefere Schichten zur Emission beitragen vermögen. Diese Arbeitshypothese hat sich als außerordentlich fruchtbar erwiesen, und zahlreiche Versuchsergebnisse lassen überdies den Schluß zu, daß es sich nicht nur um eine Arbeitshypothese handelt, sondern daß die Vorstellungen den wirklichen Verhältnissen sehr nahe kommen. Durch den Herstellungsgang einer modernen Cäsiumoxydkathode wird eine Zwischenschicht erzielt, die aus Cs_2O und eingelagerten Cs-Atomen, gegebenenfalls auch feinverteilten Fremdmetallatomen wie Ag-Atomen⁵⁸⁾, besteht. An der sehr rauen Oberfläche sitzt die die Austrittsarbeit herabsetzende Dipolschicht mit positiver Belegung nach außen. Symbolisch läßt sich die Schicht durch den Ausdruck $[Ag]-Cs_2O$, Cs-Cs oder aber, wenn Ag der Zwischenschicht in feiner Verteilung einver-

62 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

leibt ist, durch $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}$, Ag , $\text{Cs}-\text{Cs}$ beschreiben. Die spektrale Verteilung der letzteren Kathode ergibt sich aus der Abb. 29 und dürfte unter Berücksichtigung, daß das langwellige Maximum zwischen 750 und $850 \text{ m}\mu$ streut, in der dargestellten Weise dem zuletzt erreichten

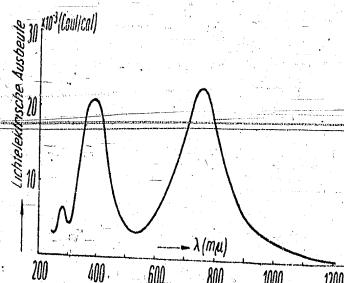


Abb. 29. Spektrale Verteilung einer $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}$, Ag , $\text{Cs}-\text{Cs}$ -Kathode.

Standen entsprechen. Der Unterschied in den spektralen Verteilungen der Kathoden ohne und mit Ag-Einlagerung besteht darin, daß im Mittel die letzteren eine geringe Rotverschiebung des langwelligsten Maximums aufweisen. Die Rotverschiebung dürfte durch eine Gitterauflockerung, hervorgerufen durch die zusätzliche Fremdmetalleinlagerung, erklärbar sein. Der besseren Übersicht wegen sei in Tab. 4 zusammengestellt, wie sich die langwellige Grenze und das langwellige Maximum ändern, wenn man mit einer Cs, O-Adsorptionschicht beginnend zu den modernen Cäsiumoxydkathoden übergeht.

Tab. 4. Langwellige Grenzen und langwellige Maxima zusammengesetzter Cs-Kathoden

Kathode	Langwellige Grenze λ_0 in $\text{m}\mu$	Langwelliges Maximum λ_{max} in $\text{m}\mu$
$[\text{Ag}]-\text{O}, \text{Cs}$	800	350
$[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}-\text{Cs}$	900-1100	620
$[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}, \text{Cs}-\text{Cs}$	1100-1200	700-800
$[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}, \text{Cs}, \text{Ag}-\text{Cs}$	1200-1300	750-850

Mit dem komplizierteren Aufbau der zusammengesetzten Cs-Kathoden (vgl. Tab. 4) geht eine Empfindlichkeitssteigerung der Schichten

§4. Zusammengesetzte Kathoden

63

parallel. Die empfindlichsten Kathoden ergeben sich demnach, wenn der Schichtaufbau $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}$, Cs , $\text{Ag}-\text{Cs}$ erreicht ist. Der Übergang von einer $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}$, $\text{Cs}-\text{Cs}$ -Kathode zu einer $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}$, Cs , $\text{Ag}-\text{Cs}$ -Kathode wird dadurch erzielt, daß man zusätzlich Ag-Atome eindiffundieren läßt. Ist einmal die Schicht zusätzlich mit Ag-Atomen geimpft, so ändern sich die langwellige Grenze sowie die Lage des langwelligsten Maximums nicht mehr wesentlich⁵⁰⁾. Die Empfindlichkeit jedoch steigt, falls die Temperatur der Kathode während der Ag-Aufdampfung über Zimmertemperatur liegt, zunächst proportional der Ag-Konzentration, um nach Überschreiten eines Maximums der Ag-Konzentration wieder abzunehmen⁶⁰⁾. Im Maximum liegt die Zahl der Ag-Atome in der gleichen Größenordnung wie die Zahl der Cs_2O -Moleküle.

e) Alkalioxydkathoden

Ersetzt man α) die Ag-Unterlage, β) das Cs selbst und γ) die in die Zwischenschicht eingelagerten Ag-Atome durch entsprechend ähnliche Metalle, so wird man feststellen, daß der Kathodentypus $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}$, Cs , $\text{Ag}-\text{Cs}$ sowohl die größte Gesamtempfindlichkeit wie auch die

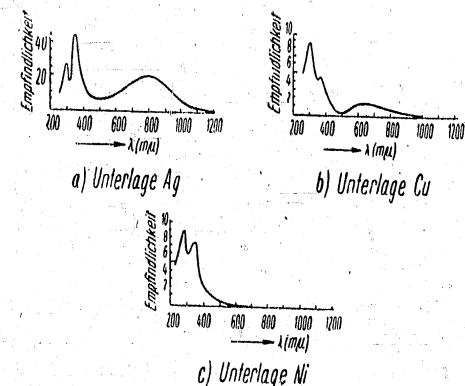


Abb. 30. Abhängigkeit der spektralen Verteilung einer Cs_2O -Kathode von der Unterlage.

größte Rotempfindlichkeit aufweist. In Abb. 30 sind spektrale Verteilungen von Zellen wiedergegeben, bei denen nach α) die Ag-Unterlage (Abb. 30a) durch eine Cu- (Abb. 30b) bzw. Ni-Unterlage (Abb. 30c) ersetzt worden ist. Während die Rotempfindlichkeit sehr stark zurück-

64 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

getreten ist, bleibt die UV-Empfindlichkeit nahezu erhalten. Ersetzt man nach β) das Cs durch eines der übrigen Alkalimetalle, so ergibt sich die Lage der langwelligen Maxima bei immer kürzeren Wellen, wenn man vom Cs im periodischen System der Elemente rückwärts über Rb, K zum Na übergeht (vgl. Tab. 5)⁶¹⁾.

Tab. 5. Lage der langwelligen Maxima λ_{\max} von Alkalioxydkathoden

Kathode	λ_{\max} in $m\mu$
[Ag]—Cs ₂ O, Cs-Cs	700—800
[Ag]—Rb ₂ O, Rb—Rb	620—680
[Ag]—K ₂ O, K—K	460—520

Für Na- und Li-Oxydkathoden kann ein langwelliges Maximum nicht mehr angegeben werden, weil dieses bereits im ersten kurzweligen Maximum, welches für alle Alkalioxydkathoden die gleiche Lage hat, untergeht. Der Austausch nach γ) der in die Zwischenschicht eingelagerten Ag-Atome durch Schwermetalle führt zu einer Gesetzmäßigkeit⁶²⁾. Mit zunehmendem Atomvolumen verlagert sich das langwellige Maximum nach kürzeren Wellenlängen. Von dieser Regel sind lediglich die Alkali- und Erdalkalimetalle und das Ag selbst ausgenommen.

Die Abb. 29 und 30 geben gleichzeitig Gelegenheit, sich über das Verhalten der Cs₂O-Kathoden im UV bis zur Wellenlänge 250 $m\mu$ zu orientieren. Unterhalb von 250 $m\mu$ wird weiterhin ein bandenartiger Charakter der spektralen Verteilung gemessen, und zwar nicht nur an Kathoden mit Oxydzwischenschichten, sondern auch an Zwischenschichten von CaF₂ und organischen Substanzen, wie Anthrazen⁶³⁾. Im allgemeinen werden die Maxima, die im ultravioletten Spektralbereich liegen, mit „kurzwellige Maxima“ bezeichnet und von der längerwelligen zur kurzweligen Seite fortlaufend nummeriert. Es steht außer Zweifel, daß die genaue Kenntnis der Lage der Maxima sowie der Bedingungen, die zu ihrem Auftreten führen, zur Aufklärung des Emissionsmechanismus zusammengesetzter Kathoden beitragen kann; denn es scheint sichergestellt zu sein, daß die kurzweligen Maxima von Elektronen herrühren, die tiefen Schichtlagen entstammen.

§ 4. Zusammengesetzte Kathoden

65

f) Bedeutung der Fremdmetalleinlagerung

Über die Bedeutung der Fremdmetalleinlagerung bzw. speziell der Einlagerung von Ag ist noch nicht völlige Klarheit erzielt worden. Zunächst liegt es nahe, zu vermuten, daß die Fremdmetalleinlagerung die Leitfähigkeitsverhältnisse der Zwischenschicht verbessert. Die ungehinderte Rekombination der Elektronen durch eine verbesserte Leitfähigkeit ergibt ohne Zweifel weniger starke „Ermüdungserscheinungen“. Jedoch kann den Versuchsergebnissen entsprechend dieser Grund nicht allein für die durch eine Ag-Einlagerung mögliche Empfindlichkeitssteigerung angesprochen werden. Die Diskussion der in Abb. 31 wiedergegebenen Kurven läßt eine andere Deutung zu⁶⁰⁾.

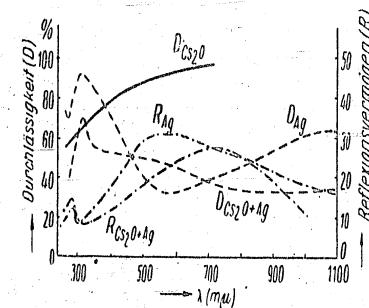


Abb. 31. Durchlässigkeit und Reflexion einer Cs₂O, Cs—Cs-Schicht auf Quarz (D_{Cs2O}), einer Cs₂O, Cs—Cs-Schicht mit aufgebrachten Ag-Atomen (D_{Cs2O+Ag}; R_{Cs2O+Ag}) und einer 18 Atomschichten starken Ag-Schicht (D_{Ag}; R_{Ag}).

Durch Aufdampfen einer Ag-Schicht auf eine Cs₂O-Zwischenschicht, die sich auf einer Quarzplatte befindet, kann die spektrale Durchlässigkeit (D_{Cs₂O}) stark vermindert werden (D_{Cs₂O+Ag}). Das spektrale Reflexionsvermögen (R_{Cs₂O+Ag}) nimmt zu und zeigt ein Maximum in der Gegend des lichtelektrischen langwelligen Maximums, ähnlich dem Reflexionsvermögen einer ~ 18 Atomschichten starken Ag-Schicht (R_{Ag}). Es läßt sich daher die Vermutung aussprechen, daß das eingeschaltete Licht an gebildeten Ag-Komplexen zerstreut wird und somit durch bessere Ausnutzung eine Steigerung des Emissionsstromes bewirkt wird. Daß auch diese Erklärung allein nicht voll befriedigen kann, liegt in der Erkenntnis, daß Ag möglichst in atomarer Verteilung der Zwischenschicht einverleiben zu müssen, um eine maximale Emp-

Görlich, Die lichtelektrischen Zellen

5

70 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

über nahezu gleichen Empfindlichkeit dünner Schichten führen. Bei der Dickenbemessung der durchsichtigen Ag-Schicht muß berücksichtigt werden, daß einmal die Leitfähigkeit gewährleistet bleibt, jedoch andererseits noch keine zu starke Absorption des Lichtes, welches bei diesen Schichten von der Rückseite einfällt (vgl. Abb. 26), auftritt. Eine einwandfreie Schichtdickenbestimmung für eine Serienherstellung dünner Schichten ist durch die photoelektrische Messung der Lichtabsorption gegeben.

Es seien die Einzelheiten eines der möglichen Verfahren gestreift. Zunächst wird eine Silberschicht mit einer Lichtdurchlässigkeit bis zu 35—40 % auf eine Glasunterlage aufgedampft. Sodann wird zwecks Oxydation der Silberschicht eine Glimmentladung in Sauerstoff so lange aufrechterhalten, bis die Durchlässigkeit der Schicht wieder 60—70 % beträgt. Eine abermalige Versilberung soll die Durchlässigkeit auf etwa 50—55 % herabsetzen. Alsdann erfolgt das Eindestillieren des Cs zweckmäßig in die auf $\sim 120^{\circ}\text{C}$ erhitzte Zelle und unter Anlegung einer Vorspannung so lange, bis ein Maximum des Photostromes erzielt worden ist. Im Maximum des Photostromes hat man die Cs-Zufuhr sofort zu unterbrechen. Durch weiteres langsames Hochheizen der Zelle bis auf $\sim 150^{\circ}\text{C}$ erzielt man einen weiteren Anstieg des Photostromes. Geringe zusätzliche Cs-Gabe und schwache Nachversilberung beenden den Prozeß (Verfahren stammt im wesentlichen von HEIMANN aus dem Jahre 1940 mit zusätzlichen Verbesserungen des Verfassers). Ein etwas vereinfachtes Verfahren gibt SCHÄTTI⁷³⁾ neuerdings an.

m) Mosaikartige Photozellenflächen

Auch für die Herstellung mosaikartiger Photozellenflächen mit Rotempfindlichkeit besteht weitestgehendes technisches Interesse (Bildspeicherrohre). Man geht hierbei so vor, daß man eine Glimmerscheibe mit einer dünnen Ag-Schicht versieht und dann die Schicht thermisch zerstört bzw. aufrastert. Anschließend folgt die Oxydation und das Eindestillieren des Cs wie bei nichtgerasterten Kathoden. Gefordert wird nun, daß alle lichtempfindlichen Bezirke gut voneinander isoliert sind. Man ist daher gezwungen, nur streng dosierte Mengen des Cs einzulassen, was jedoch zur Folge hat, daß die maximal zu erreichende

§4. Zusammengesetzte Kathoden

71

Empfindlichkeit nicht immer erzielt wird. Eine weitere Forderung, nämlich ein großer Bedeckungsfaktor, ergibt sich daraus, daß das Photozellenraster mit einem Elektronenstrahl abgetastet werden muß und, um Ungleichmäßigkeiten zu vermeiden, möglichst viel lichtempfindliche Bezirke vom Strahlquerschnitt erfaßt werden sollen. Hat der Strahl einen Durchmesser von $\sim 0,1\text{ mm}$, so erfüllen lichtempfindliche Bezirke mit einem Durchmesser von $0,02\text{ mm}$ gerade noch alle Bedingungen.

Wie vorstehend unter c) bereits erwähnt, läßt sich eine Sensibilisierung auch durch Se erzielen. Man kann daher ein Photozellenmosaik dadurch erhalten, daß man auf die isolierende Unterlage Se in Tröpfchenform aufdestillieren läßt und das entstandene Raster den Cs-Dämpfen aussetzt.

Schwierigkeiten ergibt im allgemeinen die Beschaffung gleichmäßiger und genügend dünner Glimmerblätter⁷⁴⁾, so daß der Übergang zu dünnen keramischen Platten empfehlenswert erscheint.

n) Legierungskathoden

Gemäß der Definition der zusammengesetzten Schichten, die am Anfang des Abschnittes IV, § 4 gegeben wurde, müssen auch die von GÖRLICH gefundenen Legierungskathoden als solche angesehen werden. Es hat sich gezeigt, daß sich durch Einwirkung eines Alkalimetalls, insbesondere Cs, auf ein Metall geringer Leitfähigkeit wie Sb, Bi, Tl, Pb u.ä. eine Schicht hoher lichtelektrischer Empfindlichkeit ergibt⁷⁵⁾. In der ersten Veröffentlichung wurden zunächst nur dünne durchsichtige Schichten ohne metallische Unterlage untersucht, und es ergab sich das bemerkenswerte Resultat, daß keineswegs immer die größten Photostrome im auffallenden Licht erhalten werden, sondern daß bei bestimmten Schichtdicken ein größerer Photostrom im durchfallenden Lichte als im auffallenden erzielt werden kann. Hieraus läßt sich der Schluß ziehen, daß offenbar die ganze Schicht emissionsfähig ist.

Betrachtet man die bisher empfindlichste Kombination, die sich durch Einwirken von Cs auf Sb ergibt, so sei der Schichtaufbau symbolisch durch Sb, Cs—Cs ausgedrückt. Die spektrale Verteilung dieser

72 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

Schicht entnimmt man der Abb. 32. Die langwellige Grenze liegt zwischen 750 und 850 μm , und die thermisch gemessene Austrittsarbeit hat etwa den Wert 1,3 V. Im ultravioletten Spektralbereich

weist die spektrale Verteilungskurve der Schicht keinen so ausgeprägten bandenartigen Charakter auf wie die Cäsiumoxydkathoden.

Die Empfindlichkeit liegt etwa um das Vierfache höher, so daß die Sb, Cs—Cs-Schicht im Augenblick als die höchstempfindliche Schicht im UV anzusprechen ist. Wie weit neuere Zellen mit einer auf Cu aufdestillierten CuJ-Schicht im extremen UV als Konkurrenz auftreten können, läßt sich noch nicht überschauen⁷⁹⁾.

Dicke, nicht mehr durchsichtige Schichten werden geringere Empfindlichkeiten aufweisen als dünne, falls ihnen keine gut leitende Metallschicht untergelegt wird, weil der elektrische Widerstand für die Nachlieferung der Elektronen zu groß werden kann. Durch das Aufbringen einer Sb, Cs—Cs-Schicht von einer Dicke, bei der in der Schicht gerade eben keine Leitfähigkeitschwierigkeiten auftreten, auf eine Ag-Unterlage⁷⁷⁾, ergeben sich technisch vielseitig anwendbare Kathoden mit der symbolischen Bezeichnung [Ag]—Sb, Cs—Cs, womit auch gleichzeitig gezeigt ist, daß sich die Einordnung dieses Kathoden Typs in die Gruppe der zusammengesetzten Kathoden rechtfertigt. Eine Änderung der spektralen Verteilung durch die Unterlage tritt gegenüber einer Schicht ohne Unterlage nicht auf.

Bezeichnet man allgemein die Metallkomponente geringer Leitfähigkeit mit M , das Alkalimetall mit Me und das Trägermetall (gute elektrische Leitfähigkeit vorausgesetzt) mit T , so ergibt sich die allgemeine Formel $[T] - M, Me - Me$. Die Frage nach den Eigenschaften der Kathoden, wenn T, M bzw. Me geändert werden, kann dahingehend beantwortet werden, daß das langwellige Maximum

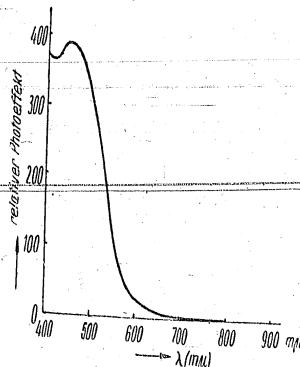


Abb. 32. Spektrale Verteilung einer durchsichtigen Sb, Cs—Cs-Schicht.

Schicht im extremen UV als Konkurrenz auftreten können, läßt sich noch nicht überschauen⁷⁹⁾.

§4. Zusammengesetzte Kathoden

73

λ_{\max} in jedem Falle zwischen 400 und 500 μm liegt⁷⁸⁾. Die Änderung des Trägermetalls hat, falls jede Diffusion von Trägermetallatomen in der Zwischenschicht vermieden wird, weder auf die spektrale Verteilung noch auf die Größe und Empfindlichkeit einen Einfluß. Man er sieht hieraus die Bedeutung, die das Unterlagemetall bei den Kathoden des Typus $[T] - \text{Cs}_2\text{O}, \text{Cs}, \text{Ag} - \text{Cs}$ zusätzlich hat. Bei den letzteren Schichten wirkt sich die Wahl der Unterlage, wie oben bereits gezeigt wurde, nicht nur auf die Empfindlichkeit, sondern auch auf die spektrale Verteilung aus. Man könnte sich für die Legierungsschichten höchstens dann eine Abhängigkeit vom Unterlagemetall vorstellen, wenn die Zwischenschicht so dünn ist, daß sich die an der Grenze zwischen Unterlagemetall und Zwischenschicht möglichen gegenseitigen Gitterverzerrungen auf den lichtelektrischen Ablöseakt auswirken können. Die höchsten Empfindlichkeiten werden jeweils mit Cs als Alkalikomponente erreicht. Dann folgen die Schichten mit Rb, K und Na. Lediglich Li als Alkalikomponente fällt aus der Reihenfolge heraus. M, Li—Li-Schichten erreichen Empfindlichkeiten, die in der Größenordnung der Schichten mit Rb als Alkalikomponente liegen. Da nun die langwelligen Grenzen von Cs, Rb, K, Na zum Li als Alkalikomponente immer kürzerwelliger liegen, hat die M, Li—Li-Schicht den Vorteil, bei einer verhältnismäßig großen Empfindlichkeit den kleinsten thermischen Emissionsstrom zu zeigen, d. h. das Verhältnis Nutzsignal/Störsignal für diese Zellen liegt günstiger als für die übrigen Schichten.

o) Empfindlichkeitsvergleich zusammengesetzter Kathoden und Quantenausbeute

Einen Überblick über die Empfindlichkeiten, wie sie sich etwa nach dem heutigen Stand darstellen, gibt Abb. 33. Dort sind die spektralen Verteilungen der Schichten (zum Unterschied zu früheren spektralen Verteilungen jedoch nicht auf Einheiten einfallender Energie umgerechnet, so daß die Eigenschaften der Lichtquelle darin enthalten sind) a) [Ag]—Sb, Cs—Cs, b) [Ag]—Sb, Li—Li, c) [Ag]—Cs₂O, Cs, Ag—Cs sowie d) der Thermostrom wiedergegeben. Die Kurven lassen sich bei Belichtung mit einer Lichtquelle der Farbtemperatur 2180° K messen. Bekanntlich errechnet sich der Photostrom aus der Gleichung

$$i_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (57)$$

74 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

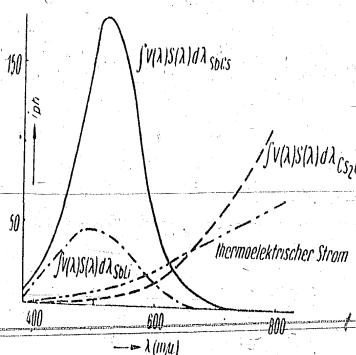


Abb. 33. Spektrale Verteilungen verschiedener hochempfindlicher Schichten gemessen mit einer Lichtquelle der Farbtemperatur 2180° K.

wenn $V(\lambda)$ die spektrale Verteilung der Kathode und $S(\lambda)$ die Energieverteilung der Lichtquelle im Bereich von λ bis $\lambda + d\lambda$ bedeuten. In Tab. 6 sind einige Zahlenwerte für Vergleichszwecke zusammengestellt.

Tab. 6. Empfindlichkeitsvergleiche zwischen den gebräuchlichsten Kathoden

Wellenlängen- bereich zwischen	$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda$		
λ_1 und λ_2 in mμ	[Ag]-Sb, Cs-Cs	[Ag]-Sb, Li-Li	[Ag]-Cs ₂ O, Cs, Ag-Cs
400–800	118,0	34,8	66,0
400–700	117,7	34,7	22,1
415–750	115,6	32,5	40,4

Wellenlängen- bereich zwischen	$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) d\lambda \quad (S = \text{const})$		
λ_1 und λ_2 in mμ	[Ag]-Sb, Cs-Cs	[Ag]-Sb, Li-Li	[Ag]-Cs ₂ O, Cs, Ag-Cs
400–800	95,4	39,2	9,5
400–700	95,4	39,2	5,5
415–750	82,6	33,8	7,2

Schließlich interessiert im Zusammenhang mit der Empfindlichkeitsfrage noch eine Betrachtung über die Quantenausbeute. Man vergleiche hierzu die Tab. 7. Sie zeigt, daß die Quantenausbeute der Sb,

§4. Zusammengesetzte Kathoden

75

Cs-Cs-Schicht außerordentlich hoch liegt, wenn man die Quantenausbeuten anderer zusammengesetzter Schichten dagegen betrachtet. Vergleichsweise liegen im allgemeinen die Quantenausbeuten von Cs₂O-Schichten im Maximum der Empfindlichkeit in der Größenordnung von 1%.

Tab. 7. Quantenausbeuten von Legierungskathoden

Schichttypus [Ag]-M, Cs-Cs für M	Leitfähigkeit von $10^{-4} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1}$	Quantenausbeute im Maximum der Empfind- lichkeit in %
Bi	0,88	~ 10
Hg	1,04	~ 0,5
Sb	2,56	~ 30
Pb	4,91	~ 2
Tl	5,28	~ 1

Einen Vergleich der Empfindlichkeiten von Sb, Cs-Cs-Kathoden und Cäsiumoxydkathoden lassen auch die vom National Physical Lab. London gemessenen Werte zu⁷⁹⁾. Für die erstere Kathode wurden gemessen $\lambda_{\text{max}} = 490 \text{ m}\mu$ und $65 \times 10^{-3} \text{ Amp/Watt}$ und für die Cäsiumoxydkathode $\lambda_{\text{max}} = 850 \text{ m}\mu$ und $20 \times 10^{-4} \text{ Amp/Watt}$.

Wieweit eine von anderen Autoren⁸⁰⁾ hergestellte Schicht den Legierungsschichten gleicht, ist den bisher bekannten Literaturquellen nicht zu entnehmen. Sicher scheint es jedoch zu sein, daß die gleichen wie an Legierungskathoden angestellten Überlegungen zum Erfolg geführt haben.

p) Einfluß des Sauerstoffs

Es lag nahe zu untersuchen, wie sich die Legierungskathoden unter dem Einfluß von Sauerstoff verhalten⁷⁷⁾. Die Folge einer Sauerstoffbehandlung ist eine Verlagerung von λ_{max} und von λ_0 nach längeren Wellen und damit verbunden eine Empfindlichkeitssteigerung. Ähnliche Ergebnisse erzielt man mit einer Schwefel- oder Selenbehandlung⁸¹⁾.

q) Aufbau der Legierungskathoden

Die genauere Bestimmung der Schichtzusammensetzung⁸²⁾ führt für die Fälle Cs und Rb mit Bi und Sb zur stöchiometrischen Formel MMe_3 . Während des Formiervorganges wird ein Verschwinden der

76 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

metallischen Reflexion beobachtet, so daß bereits die Schicht $SbCs_3$ als an der Grenze Legierung-Ionengitter stehend betrachtet werden kann. Wenn auch nicht im gleichen Maße wie bei den Cs_2O -Schichten wird man bei den Legierungsschichten ungleichmäßige Emissionsverteilung erwarten müssen. Von der Geschwindigkeit des Sb-Aufdampfprozesses und der dabei herrschenden Temperatur hängt der Zustand der Schicht, ob amorph oder kristallin, ab. Zwar ist im lichtempfindlichen Endzustand die Zusammensetzung der Legierungsschicht nahezu unabhängig davon, ob als Ausgangsschicht eine amorphe oder kristalline Sb-Schicht diente, jedoch wird man erwarten können, daß sich mechanisch oder durch Temperaturwechsel gebildete Risse oder andere Gitterfehler einstellen, die zu Ungleichmäßigkeiten in der Emission Veranlassung geben können. Vollständige Aufklärung über den Emissionsmechanismus wird man erst dann erhalten können, wenn man genauestens sowohl die Anfangsbedingungen, also die Struktur der Sb-Schicht, als auch die Struktur der gebildeten Legierung beherrscht. Richtungweisende Veröffentlichungen darüber liegen bereits vor⁸³⁾. Durch weitergehende Untersuchungen⁸⁴⁾ ist es nahegelegt, daß auch noch Verbindungen anderer stöchiometrischer Zusammensetzung als $SbCs_3$ mit lichtelektrischer Empfindlichkeit auftreten können, obwohl aus einer Reihe von Untersuchungen CHLEBNIKOWS⁸⁵⁾ hervorzugehen scheint, daß $SbCs_3$ mit einem Überschuß von $\sim 10\%$ Cs die stabilste und empfindlichste Kathode ergibt.

r) Herstellung der Legierungskathoden

Entsprechend dem Verwendungszweck haben sich einige unterschiedliche Herstellungsverfahren herausgebildet⁸⁶⁾. Man dampft Sb auf eine Ag-Unterlage oder, falls durchsichtige Schichten benötigt werden, direkt auf die Zellenwand auf und läßt Cs eindestillieren, und zwar so lange, bis ein Maximum der Empfindlichkeit auftritt. Der Formvorgang, der im wesentlichen aus einem Temperaturprozeß besteht, kann bereits während des Eindestillierens des Alkalimetalls begonnen werden. Eine durchsichtige Kathode soll eine rötlichbraune Färbung zeigen. Nach einem anderen Verfahren empfiehlt es sich, zunächst das Alkalimetall niederzuschlagen und darauf das Sb aufzudampfen. Schließlich kann insbesondere für dicke Schichten ein drittes

§ 4. Zusammengesetzte Kathoden

77

Verfahren genannt werden, welches sich als eine Verbindung der beiden erstgenannten darstellt. Danach werden schichtenweise übereinander einmal Sb und sodann Cs aufgebracht. Der Vorteil des letzteren Verfahrens beruht in der Möglichkeit, eine genaueste Dosierung zu erzielen und hat auch wahrscheinlich aus diesem Grunde die bisher emissionsfähigsten Schichten ergeben. Die Fortsetzung der Gedankengänge läßt für die Zukunft noch bessere Verfahren und damit noch empfindlichere Schichten erhoffen.

Nach PRILEZAEV, S. S., ergeben sich Schichten mit nahezu idealer Sättigung der Strom-Spannungscharakteristik bis zu Beleuchtungen von 20000 lx, wenn man die Legierungsschicht auf eine dünne Unterlage aus amorphem Wolfram aufbringt.

Es dürfte sich im Hinblick auf zu erwartende neue Erkenntnisse und im Hinblick auf die Sekundäremission der Sb, $Cs-Cs$ -Kathode (vgl. V, §2f.) lohnen, auch freischwebende Sb, $Cs-Cs$ -Schichten herzustellen, etwa dadurch, daß man wie LOTMAR⁸⁷⁾ Antimon auf Zaponlackfolien aufdampft und alsdann den Zaponlack mit Amylazetat ablöst. Eine derartige freischwebende Sb-Schicht würde mit Cs in üblicher Weise behandelt werden müssen. Freischwebende Sb, $Cs-Cs$ -Schichten ließen sich vorzüglich an Stelle von sekundäremissionsfähigen Netzen in Netzvervielfächern (vgl. IX, § 2e) benutzen.

s) Kombination von Cäsiumoxyd- und Legierungsschichten

Betrachtet man die spektralen Verteilungen einer Cs_2O -Schicht und einer Legierungsschicht, so sieht man, daß letztere Schicht gerade bei einer Wellenlänge ein Maximum aufweist, bei der die erstere ein Minimum besitzt. Die Kombination beider Schichten muß daher eine Zelle ergeben, die über dem gesamten sichtbaren Spektralbereich eine nahezu gleichmäßige Empfindlichkeit aufweist. Bei der Herstellung einer solchen Zelle wird man am einfachsten die Vorderseite des Zellengehäuses mit einer durchsichtigen Legierungsschicht belegen und die Rückseite mit einer kompakten Cs_2O -Schicht⁸⁸⁾. Abb. 34 zeigt ein Beispiel. Gibt man der Cs_2O -Schicht in einer solchen Doppelschichtzelle eine Vorspannung, die positiv gegen die der Legierungsschicht ist, daß also die kompakte Schicht zur Sekundäremissionskathode wird, so kann die Zelle auch als Vervielfacher mit einer Stufe betrachtet wer-

78 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

den. Die Herstellung einer Doppelschichtzelle bietet erhebliche Schwierigkeiten, denn die Formiermethoden für die beiden in der Zelle vorhandenen Schichten weichen wesentlich voneinander ab.

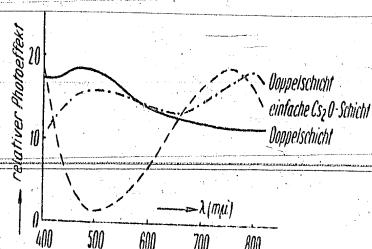
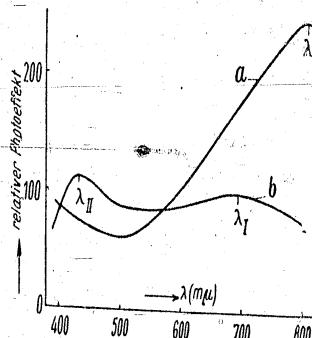


Abb. 34. Spektrale Verteilungen von Doppelschichtzellen.

Ein physikalisch interessanterer Weg, Photokathoden mit konstanter Empfindlichkeit über den ganzen sichtbaren Spektralbereich zu erzielen, beruht auf der Tatsache, daß dünne Schichten langsame Elektronen selektiv durchzulassen vermögen⁶⁷⁾. Man bringt auf eine Cs₂O-Schicht eine durchsichtige Legierungsschicht auf. Ein Teil der lichtelektrisch in der Cs₂O-Schicht ausgelösten Elektronen durchsetzt die Legierungsschicht, und zwar sind es vermutlich diejenigen Elektronen, deren Materiewellenlänge mit der in der Durchsichtsschicht möglichen stehenden Welle übereinstimmt (nach FOWLER und OLPIN). Diese bilden mit den in der Legierungsschicht ebenfalls lichtelektrisch ausgelösten Elektronen den Photostrom. Das in Abb. 35 wiedergegebene

Abb. 35. Spektrale Verteilungen
a) einer [Ag]-Cs₂O, Cs, Ag-Cs-Kathode
b) einer [Sb, Cs]-Cs-Schicht auf [Ag]-Cs₂O, Ag-Cs
([Sb, Cs]-Cs-Schicht durchsichtig).

§ 4. Zusammengesetzte Kathoden

79

Beispiel läßt das langwellige Maximum der Cs₂O-Schicht erkennen, welches eine mäßige Verlagerung nach kürzeren Wellen erfahren hat, und ferner das langwellige Maximum der Durchsichtskathode, welches das Minimum der Cs₂O-Schicht ausfüllt.

Theoretische Betrachtungen⁶⁷⁾ ergeben für die Kombination beider Schichten eine langwellige Grenze, die dem Quotienten $\frac{\lambda_0 \text{Cs}_2\text{O}}{\lambda_0 \text{Cs}_2\text{O} + \lambda_0 \text{Sb, Cs}}$ proportional ist. Außerdem wird theoretisch erwartet, daß die Ans-
beute im Gebiet des Maximums der Legierungsschicht beträchtlich herabgesetzt und daß das langwellige Maximum der Oxydschicht auf der roten Seite beschnitten wird. Die scheinbare Verlagerung des Oxydschichtenmaximums nach kürzeren Wellenlängen wird nicht durch eine Verschiebung des Absorptionsbandes hervorgerufen. Die experimentellen Befunde stehen in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Erwägungen.

b) Möglichkeiten zur experimentellen Erfassung des lichtelektrischen Ablöseaktes

Durch den Abschnitt I § 1 sollte eine Vorstellung über den lichtelektrischen Ablöseakt, wie sie sich zwangsläufig aus modernen theoretischen Betrachtungen ergibt, vermittelt werden. Es drängt sich dabei die Frage auf, wie man dem lichtelektrischen Ablöseakt auch experimentell nähern kann. Ein gangbarer Weg dürfte sich in der Benutzung der Hyperfeinstruktur einer Spektrallinie bieten. Man untersuche die Hyperfeinstruktur einer Spektrallinie, nachdem sie eine dünne lichtempfindliche Schicht durchsetzt hat und vergleiche die Lage und die Intensität der Feinstrukturkomponenten mit denen der aufgelösten gleichen Linie ohne Absorption durch die lichtempfindliche Schicht. Vorausgesetzt, daß eine Linie verwandt wurde, die einen lichtelektrischen Effekt in der lichtempfindlichen Schicht hervorrufen kann, könnte eine Komponentenverschiebung bzw. Verbreiterung in der Feinstruktur auf einen COMPTON-Effekt im langwelligen Spektralbereich schließen lassen.

Die großen experimentellen Schwierigkeiten ließen sich mindern, wenn man für die Untersuchungen eine Legierungskathode, etwa eine

⁶⁷⁾ Bisher unveröffentlichte Überlegungen von G. MAURER, die brieflich dem Verfasser mitgeteilt wurden.

§1. Glühemission

83

Für technische Glühkathoden sind nur die hoch erhitzbaren und damit höher schmelzenden Metalle geeignet, die, vom lichtelektrischen Standpunkte gesehen, nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die technisch wichtigen Daten solcher Metalle (wie auch von zusammengesetzten Glühkathoden, z. B. Oxydkathoden u.ä.) entnimmt man zweckmäßig solchen Kurven, die die Abhängigkeit des spezifischen Emissionsstromes (in mA/cm²) und der Ausbeute (d. i. die Emission, bezogen auf den Heizaufwand in mA/Watt Heizleistung) von der wahren Temperatur T_w wiedergeben. Nicht nur in bezug auf die Austrittsarbeit (vgl. Tab. 8 sowie 3) und auf die lichtelektrische Ausbeute (vgl. IV, § 2b und Abb. 19 und 20) ergibt sich eine Abhängigkeit von der Stellung des Metalls im periodischen System, sondern auch für die Größe der thermischen Emission. Es seien zum Beweise dieser Behauptung lediglich die technisch wichtigen Metalle herangezogen. Das Th in der vierten Gruppe des periodischen Systems zeigt die größte thermische Emission, sodann folgt das Hf und das Zr. Mit geringerer Emission schließen sich die Metalle der fünften Gruppe, nämlich Nb und Ta, und die der sechsten Gruppe, Mo und W, an. Den Abschluß bilden die Metalle der Pt- und Fe-Gruppe⁹⁰).

c) Abhängigkeit der Austrittsarbeit von der Orientierung der Kristalle

Wellenmechanische Betrachtungen⁹¹ führen zu der Erkenntnis, daß die Austrittsarbeit φ_{gl} lediglich als Mittelwert über die gesamte Emissionsfläche zu betrachten ist. Die örtliche Austrittsarbeit hängt merklich von der Orientierung des betrachteten Emissionsflächenelementes zu den Kristallachsen ab. Die verschiedenen gelagerten Metallkristallite ergeben eine von Ort zu Ort verschiedene Austrittsarbeit. In IV, § 2c wurde erwähnt, daß bei der lichtelektrischen Emission die Verhältnisse ähnlich liegen. Es ist notwendig zu bemerken, daß die Kristallstruktur überdies einen Einfluß auf die Mengenkonstante A_{gl} ausübt. Ein geeignetes Untersuchungsverfahren bietet sich in der Elektronenmikroskopie an⁹²).

d) Herabsetzung der Austrittsarbeit durch Adsorption elektropositiver Metalle

Die Adsorption von Ionen und Atomen elektropositiver Metalle auf Metalloberflächen bewirkt neben der Herabsetzung der Austrittsarbeit (vgl. die Betrachtungen über die Austrittsarbeit II, § 2d und

80 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem äußeren lichtelektr. Effekt

Cs, Sb-Cs-Kathode, ein FABRY-PÉROT-Interferometer bzw. wegen seines größeren Auflösungsvermögens ein Multiflex-Interferenzspektroskop nach GEHRCKE und LAU⁸⁹) und die grüne Hg-Linie 5461 Å verwendete. Im Bereich dieser Linie zeigt die Legierungskathode eine hohe lichtelektrische Empfindlichkeit (vgl. IV, § 4n). Orientierende Beobachtungen des Verfassers ließen auf Verbreiterung einer Komponente schließen.

84 Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden

die lichtelektrischen Folgerungen IV, § 3) auch eine Änderung der Mengenkonstante, und zwar in der Weise, daß mit einer Herabsetzung von φ_{gl} auch A_{gl} erheblich kleiner wird. Durch die Bedeckung der Oberfläche mit Ionen und Atomen wird eine Änderung der Austrittsarbeit hervorgerufen, die sich nach Gleichung

$$\Delta\varphi_{\theta} = C_{\theta} - \beta_{\theta} T \quad (58)$$

darstellen läßt. In die RICHARDSONsche Gleichung (42) eingeführt, lautet diese dann

$$i_s = A_{gl} T^2 e^{-\frac{e(\varphi + \Delta\varphi_{\theta})}{kT}}, \quad (59)$$

woraus

$$i_s = A_{gl} e^{-\frac{e\beta_{\theta}}{k} T^2} e^{-\frac{e(\varphi + C_{\theta})}{kT}} \quad (60)$$

folgt; die neue Mengenkonstante A_{θ} hat demnach den Wert

$$A_{\theta} = A_{gl} e^{-\frac{e\beta_{\theta}}{k}}. \quad (61)$$

C_{θ} und β_{θ} sind Konstanten, die nur vom Bedeckungsgrad abhängig sind. Lichtelektrisch ergab sich (IV, § 3a), daß mit zunehmendem ϑ die langwellige Grenze λ_0 nach langen Wellen als Folge einer Verminderung der Austrittsarbeit verschoben wird, und zwar so lange, bis die maximale Bedeckung ϑ_{max} erreicht ist. Schon die älteren glühelektrischen Messungen lassen Aussagen über den zahlenmäßigen Wert von ϑ_{max} zu. Danach ist z. B. der maximale Bedeckungsgrad ϑ_{max} , für den ein Minimum der Austrittsarbeit φ_{min} erreicht wird, für Cs auf W 0,67, also < 1 . Die Zahl der Atome/cm² liegt dabei in der Größenordnung von 10^{14} . Für einige bekannte Adsorptionsschichten sind die Werte für φ_{min} und A_{θ} in der Tab. 10 zusammengestellt.

Tab. 9. Thermisch bestimmte Austrittsarbeit $\varphi_{\theta min}$ (in Volt) und Mengenkonstante A_{θ} (in Amp/cm² Grad²) einiger bekannter Adsorptionsschichten

Adsorptionsschicht	$\varphi_{\theta min}$	A_{θ}
[W]-Cs	1,38	3,26
[W]-Th	2,63 bis 2,69	3 bis 7
[W]-Ba	1,56	
[W]-La	2,71	8,0
[Mo]-Th	2,58	1,5

§ 1. Glühemission

85

Nach der RICHARDSONschen Gleichung (42) besteht zwischen der Austrittsarbeit und dem log des Emissionsstromes Proportionalität. Daher muß die thermische Emission von Adsorptionsschichten mit Dipolen, deren positive Seiten nach außen gelagert sind, um das Vielfache gegenüber reinen Metallocberflächen ansteigen. Als Beispiel wird das Emissionsvermögen einer [W]-Th-Kathode herausgegriffen. Bei einer Temperatur von 1500° K ist das Emissionsvermögen der [W]-Th-Kathode 10^{15} mal größer als das einer reinen W-Kathode.

e) Oxydierte Metallocberflächen

Oxydierte Metallocberflächen zeigen nach thermischen Untersuchungen erwartungsgemäß ebenso wie nach lichtelektrischen Untersuchungen (vgl. IV, § 4c) eine Erhöhung der Austrittsarbeit gegenüber reinen Metallocberflächen. Die Mengenkonstante A_{θ} wird ebenfalls größer, wie Tab. 10 erkennen läßt.

Tab. 10. Thermisch bestimmte Austrittsarbeiten φ_{θ} (in Volt) und Mengenkonstante A_{θ} (in Amp/cm² Grad²) einiger oxydierter Metallocberflächen

Oberfläche	φ_{θ}	A_{θ}
[W]-O	9,2	5×10^{11}
[Zr]-O	5,2	$3,7 \times 10^4$
[Hf]-O	5,1	$5,5 \times 10^4$
[Pt]-O	8,46	

f) Oxydkathoden

Werden oxydierte Metallocberflächen mit Alkali- bzw. Erdalkaliatomen belegt, so entstehen die sogenannten „Oxydkathoden“. Der gleiche Oxydkathodentypus, der sich für die lichtelektrische Emission als hochempfindlich herausgestellt hat (IV, § 4d), wird entsprechend dem im vorhergehenden gezeigten, zwischen der lichtelektrischen und der thermischen Emission bestehenden Parallelismus auch für eine Glühkathode brauchbar sein. Obwohl die Cs₂O-Kathoden eine hohe thermische Emission aufweisen, kann ihre praktische Anwendung deshalb nicht erfolgen, weil sie bei Betriebstemperaturen, bei denen ihr hohes Emissionsvermögen dem anderer Oxydkathoden überlegen ist,

instabile Eigenschaften aufweisen. An Stelle des Cs_2O in der Zwischenschicht haben daher Oxyde mit stabileren Eigenschaften zu treten, insbesondere das BaO oder Gemische von BaO , SrO und CaO oder Zweistoffgemische der drei Erdalkalioxyde. Die BaO - und SrO -Gemische sowie die SrO - und CaO -Gemische weisen Mischkristallstruktur auf, während die BaO/ CaO -Gemische ein mikrokristallines Ge- menge bilden⁹³⁾. Wiederum kann auf Grund elektronenoptischer Untersuchungen⁹⁴⁾ die Aussage getroffen werden, daß keine gleichmäßige Emission der ganzen Oberfläche erfolgt, sondern daß die Elektronen von einigen hundertstel Millimeter großen Bezirken emittiert werden. Aus den Herstellungsverfahren der thermischen Oxydkathoden⁹⁵⁾ lassen sich einige Erkenntnisse entnehmen, die sich in das Bild über die Oxydkathoden leicht einreihen lassen und daher geeignet sind, die Anschauungen über diese Kathoden zu festigen. A) Durch Einwirkung von Sauerstoff auf die Kathoden tritt eine Vergiftung der Kathoden ein⁹⁶⁾. Offenbar oxydieren die oberflächlich adsorbierten, die Austrittsarbeit senkenden und in den obersten Schichten eingebetteten Erdalkaliatome, so daß die Gesamtemission absinken muß. B) Werden die Kathoden bis zu einer Temperatur über $1600^\circ K$ erhitzt, so entaktivieren die Kathoden⁹⁷⁾. Es kann nachgewiesen werden, daß aus der Kathode Ba verdampft und sich an Stellen niederschlägt, an denen es der Messung zugänglich gemacht werden kann, beispielsweise auf einem W-Träger, dessen thermische Emission mit zunehmender Zahl der auftreffenden und bei der Entaktivierung freiwerdenden Ba -Atome ansteigt. C) Ba -Überschuß bewirkt ein Absinken der Emission. Wenn die Oxydkathoden, wie unter A) angegeben, durch Sauerstoff vergiftet worden sind, ist eine Reaktivierung durch Temperaturbehandlung möglich. Insbesondere können auf diese Weise Kathoden mit BaO -Zwischenschichten mehrmals wieder zur Emission gebracht werden. Bestehen die Zwischenschichten hingegen aus BaO/SrO -Mischkristallen, so zeigt sich, daß diese Kathoden nicht beliebig reaktivierbar sind, weil aus dem Mischkristall die BaO -Komponente eher verdampft. Bessere Ergebnisse werden in diesen Fällen daher oft durch ein Ionenbombardement erzielt. Einen knappen Überblick über die Anwendung der verschiedenen Kathoden soll die Tabelle 11 vermitteln.

Tab. 11. Anwendungsbereiche der Glühkathoden

Kathoden-schema	Austrittsarbeit φ in Volt	Herstellung	Anwendungsbereich
W-Kathode ..	4,5	Drahtform, ohne besonderen Formierprozeß	Hochspannungsgleichrichteröhren, Elektrometerröhren, Hochvakuumsenderöhren,
Nb- sowie Ta-Kathode ..	3,9 bzw. 4,0	Drahtform, ohne besonderen Formierprozeß	gasgefüllte Gleichrichteröhren
[Mo]-Th-Kathode	2,6	Reduktion von ThO_2 -haltigem Draht durch Temperaturbehandlung	Gasgefüllte Gleichrichteröhren für niedere Spannungen
[W]-Th-Kathode	2,7		Kleinempfängerröhren für Temperaturen zwischen $1300-1500^\circ K$
[T]-BaO, Ba-Ba-Kathode oder Zweistoff- bzw. Dreistoffgemische der Erdalkalioxyde als Zwischenschicht	0,9-1,9	A. Pastekathoden durch Auftragen, Aufspritzen der Erdalkalioxyd- oder Karbonatpaste bzw. Ein-tauchen. a) Direkte Heizung	Hochvakuumgleichrichteröhren, Empfängerröhren, BRAUN-sche Röhren
		b) Indirekte Heizung	Netzbeheizte Empfängerröhren, BRAUN-sche Röhren, Speicherhöhen mit und ohne Vorabil-dung
		B. Aufdampf- oder Destillationskathoden durch Aufdampfen von Ba auf oxydierte Drähte	Direkt geheizte Verstärkerhöhen mit großer Stellheit und definierten Sättigungskurven

88 Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden

Neben der Zahl gemeinsamer Probleme, die der lichtelektrischen und der glühelektrischen Emission in physikalischer Hinsicht zu grunde liegen, besteht noch eine ganze Anzahl gemeinsam zu behandelnder Fragen in technologischer Richtung, sei es in bezug auf die Quetschfüße oder auf den Systemaufbau mit der Frage nach dem für das Vakuum günstigsten Material (Metall, Keramik, Glas) oder in bezug auf die Vorbehandlung der Einbauteile und Röhrenkolben⁹⁸⁾.

§ 2. Sekundäremission

a) Sekundäremission kompakter Metalle

Trägt man den Sekundäremissionsfaktor δ eines festen Körpers, z.B. eines Metalls, über der Spannung der Primärelektronen e_p auf, so zeigt die Kurve etwa bei Spannungen zwischen 100 und 500 V ein Maximum, welches daher röhrt, daß zunächst mit wachsender Spannung die Primärelektronen immer größere Energie besitzen und deshalb eine größere Sekundäremission hervorrufen, daß jedoch oberhalb eines gewissen e_p die Sekundärelektronen in immer größerer Tiefe ausgelöst und daher mehr und mehr absorbiert werden, so daß die Zahl der austretenden Sekundärelektronen wieder geringer wird.

Man könnte nun auf Grund der Erfahrungen aus lichtelektrischen und glühelektrischen Messungen geneigt sein anzunehmen, daß Metalle mit kleiner Austrittsarbeit auch ein gutes Sekundäremissionsvermögen besitzen und umgekehrt. Wie jedoch bereits in III, § 2a erwähnt worden ist, ist die Austrittsarbeit nicht in erster Linie maßgebend, vielmehr dürfte der Gitteranordnung des Metalls primäre Bedeutung zuzusprechen sein, wie auch aus elektronenoptischen Abbildungen ersehen werden kann⁹⁹⁾. So ergibt sich, daß Metalle in äußerst reinem und entgastem Zustand mit niedriger Austrittsarbeit (Alkalimetalle) einen Sekundäremissionskoeffizienten $\delta < 1$, hingegen Metalle mit hoher Austrittsarbeit $\delta > 1$ (bis $\delta = 2$) zeigen (vgl. Tabelle 12).

§ 2. Sekundäremission

89

Tab. 12. Vergleich zwischen Austrittsarbeit und Sekundäremissionskoeffizient einiger Metalle

Metall	φ_i in Volt	δ	e_p in Volt, für welches δ erreicht wird
Ag	4,78-4,61	~ 1,50	~ 800
Al	4,14-2,81	0,97	~ 300
Ba	2,28-1,90	0,83	~ 400
Be	3,30-3,17	0,63	~ 200
Cs	1,96-1,37	0,72	~ 400
Cu	4,63-4,07	1,29	~ 600
Li	2,42-2,28	~ 0,50	~ 100
Mg	3,74-2,74	0,95	~ 300
Ni	5,01-3,68	1,30	~ 500
W	5,36-4,52	1,30	~ 650

Aufgelockerte Metallschichten, deren Dicken bereits kompakten Metallen entsprechen (beispielsweise Ni in einer Edelgasatmosphäre verdampft), geben Sekundäremissionskoeffizienten, die wesentlich unter eins liegen. Letztere Schichten finden daher zweckmäßig Anwendung, wenn man das Auftreten einer Sekundäremission verhindern will.

b) Dünne Aufdampfschichten

Die bisherigen Betrachtungen erstrecken sich auf kompakte Metalle. Man kann jedoch Metallkathoden auch durch Aufdampfen oder Aufstäuben der Metalle erhalten. Metalle in dünner Schicht, wie Ag, Cu, Fe und Ni¹⁰⁰⁾, zeigen nun im Gegensatz zu Be-Aufdampfschichten¹⁰¹⁾ ein Sekundäremissionsvermögen, wie es die entsprechende kompakte Schicht aufweist. Anders verhalten sich Be-Aufdampfschichten, die einer Temperaturbehandlung bis 700°C unterworfen waren. Der Sekundäremissionskoeffizient dieser Schichten liegt wesentlich über dem des kompakten Be. Da die Be-Aufdampfschicht im unbehandelten Zustand ein kleineres δ als die kompakte Schicht ergibt, ist geschlossen worden, daß durch die Temperaturbehandlung eine Umwandlung von einer feinkristallinen in eine grobkristalline Struktur erzielt worden sei, aber auch, daß Verunreinigungen der Unterlage (als Unterlage kann z.B. kompaktes Be verwendet werden), die durch die Temperaturbehandlung wirksam werden, ein höheres δ vortäuschen. Für letz-

88 Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden

Neben der Zahl gemeinsamer Probleme, die der lichtelektrischen und der glühelektrischen Emission in physikalischer Hinsicht zu grunde liegen, besteht noch eine ganze Anzahl gemeinsam zu behandelnder Fragen in technologischer Richtung, sei es in bezug auf die Quetschfüße oder auf den Systemaufbau mit der Frage nach dem für das Vakuum günstigsten Material (Metall, Keramik, Glas) oder in bezug auf die Vorbehandlung der Einbauteile und Röhrenkolben⁹⁸⁾.

§ 2. Sekundäremission

a) Sekundäremission kompakter Metalle

Trägt man den Sekundäremissionsfaktor δ eines festen Körpers, z.B. eines Metalls, über der Spannung der Primärelektronen e_p auf, so zeigt die Kurve etwa bei Spannungen zwischen 100 und 500 V ein Maximum, welches daher führt, daß zunächst mit wachsender Spannung die Primärelektronen immer größere Energie besitzen und deshalb eine größere Sekundäremission hervorrufen, daß jedoch oberhalb eines gewissen e_p die Sekundärelektronen in immer größerer Tiefe ausgelöst und daher mehr und mehr absorbiert werden, so daß die Zahl der austretenden Sekundärelektronen wieder geringer wird.

Man könnte nun auf Grund der Erfahrungen aus lichtelektrischen und glühelektrischen Messungen geneigt sein anzunehmen, daß Metalle mit kleiner Austrittsarbeit auch ein gutes Sekundäremissionsvermögen besitzen und umgekehrt. Wie jedoch bereits in III, § 2a erwähnt worden ist, ist die Austrittsarbeit nicht in erster Linie maßgebend, vielmehr dürfte der Gitteranordnung des Metalls primäre Bedeutung zuzusprechen sein, wie auch aus elektronenoptischen Abbildungen ersehen werden kann⁹⁹⁾. So ergibt sich, daß Metalle in äußerst reinem und entgastem Zustand mit niedriger Austrittsarbeit (Alkalimetalle) einen Sekundäremissionskoeffizienten $\delta < 1$, hingegen Metalle mit hoher Austrittsarbeit $\delta > 1$ (bis $\delta = 2$) zeigen (vgl. Tabelle 12).

§ 2. Sekundäremission

89

Tab. 12. Vergleich zwischen Austrittsarbeit und Sekundäremissionskoeffizient einiger Metalle

Metall	φ_l in Volt	δ	e_p in Volt, für welches δ erreicht wird
Ag	4,78–4,61	~ 1,50	~ 800
Al	4,14–2,81	0,97	~ 300
Ba	2,28–1,90	0,83	~ 400
Be	3,30–3,17	0,53	~ 200
Cs	1,96–1,37	0,72	~ 400
Cu	4,63–4,07	1,29	~ 600
Li	2,42–2,28	~ 0,50	~ 100
Mg	3,74–2,74	0,95	~ 300
Ni	5,01–3,68	1,30	~ 500
W	5,36–4,52	1,30	~ 650

Aufgelockerte Metallschichten, deren Dicken bereits kompakten Metallen entsprechen (beispielsweise Ni in einer Edelgasatmosphäre verdampft), geben Sekundäremissionskoeffizienten, die wesentlich unter eins liegen. Letztere Schichten finden daher zweckmäßig Anwendung, wenn man das Auftreten einer Sekundäremission verhindern will.

b) Dünne Aufdampfschichten

Die bisherigen Betrachtungen erstrecken sich auf kompakte Metalle. Man kann jedoch Metallkathoden auch durch Aufdampfen oder Aufstäuben der Metalle erhalten. Metalle in dünner Schicht, wie Ag, Cu, Fe und Ni¹⁰⁰⁾, zeigen nun im Gegensatz zu Be-Aufdampfschichten¹⁰¹⁾ ein Sekundäremissionsvermögen, wie es die entsprechende kompakte Schicht aufweist. Anders verhalten sich Be-Aufdampfschichten, die einer Temperaturbehandlung bis 700°C unterworfen waren. Der Sekundäremissionskoeffizient dieser Schichten liegt wesentlich über dem des kompakten Be. Da die Be-Aufdampfschicht im unbehandelten Zustand ein kleineres δ als die kompakte Schicht ergibt, ist geschlossen worden, daß durch die Temperaturbehandlung eine Umwandlung von einer feinkristallinen in eine grobkristalline Struktur erzielt worden sei, aber auch, daß Verunreinigungen der Unterlage (als Unterlage kann z. B. kompaktes Be verwendet werden), die durch die Temperaturbehandlung wirksam werden, ein höheres δ vortäuschen. Für letz-

90 Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden

tere Deutung spricht, daß sich polierte Be-Unterlagen gegenüber unpolierten unterschiedlich verhalten. Wie jedoch Untersuchungen an Sb-Aufdampfschichten gezeigt haben¹⁰²⁾, liegen bei Aufdampfschichten zu verwickelte Erscheinungen vor, als daß die an Be-Aufdampfschichten gewonnenen Erkenntnisse genügend Klarheit bringen könnten. Die Größe des Sekundäremissionskoeffizienten ist nicht nur stark von der Dicke der Schicht, sondern auch von der Art der Unterlage abhängig. Außerdem liegt es nahe, wie für die lichtelektrischen Erscheinungen anzunehmen, daß die Grenzschicht zwischen Unterlage und Aufdampfschicht auch auf das Sekundäremissionsvermögen einen Einfluß hat. Daß der Sekundäremissionskoeffizient von der Schichtdicke abhängig sein muß, geht daraus hervor, daß die Eindringtiefe der Primärelektronen entsprechend ihrer Energie verschieden groß ist¹⁰³⁾. Welcher Einfluß außerdem geringen Gasmengen zuzusprechen ist, ersicht man aus Untersuchungen, die beispielsweise den Einfluß von Sauerstoff auf das Sekundäremissionsvermögen reiner Metalle bei verschiedenen Temperaturen aufgedeckt haben¹⁰⁴⁾. Das Maximum der Ausbeute kann danach durch eine Sauerstoff- und eine Temperaturbehandlung von $\delta \cong 0,6$ einer unbeeinflußten Be-Schicht auf $\delta \cong 4,0$ gehoben werden. Technisch haben behandelte und un behandelte Be- sowie Sb-Schichten starkes Interesse.

e) Sekundäremission bei schräg einfallendem Primärstrahl

Die Überlegungen, die zur Klärung der Maxima in den δ, e_p -Kurven angestellt wurden, ließen vermuten, daß ein schräg einfallender Primärstrahl eine größere Sekundäremission hervorruft als ein senkrecht auf die Emissionsfläche fallender. Der experimentelle Befund zeigt den erwarteten Effekt¹⁰⁵⁾. Die Primärelektronen lösen die Sekundärelektronen in geringer Tiefe ab, so daß die Sekundärelektronen auf ihrem Wege bis zur Oberfläche weniger absorbiert werden. Rauhe Oberflächen zeigen eine weniger ausgeprägte Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Primärelektronen. Der Einfallswinkel ist in diesem Falle nicht genügend scharf definiert.

d) Adsorptionsschichten

In welchem Maße der Sekundäremissionskoeffizient δ von der Austrittsarbeit abhängig ist, läßt sich an Hand der Abb. 37 veranschau-

§ 2. Sekundäremission

91

lichen¹⁰⁶⁾. Man sieht, daß durch Herabsetzung der Austrittsarbeit, herverufen durch Adsorption von Th-Atomen, an einer W-Oberfläche das Sekundäremissionsvermögen gesteigert werden kann, jedoch ist die Abhängigkeit von

der Austrittsarbeit nur gering, da die Energie der Sekundärelektronen verhältnismäßig groß ist. Sind

die Primärenergien groß, so dürfte die Emissionssteigerung in der Tat durch die Herabsetzung der Austrittsarbeit hervorgerufen sein, während bei niedrigeren Primärenergien durch die geringe Eindringtiefe der Elektronen die adsorbierten Atome selbst zur Quelle der Sekundärelektronen werden können. Eine technische Anwendung der Kathoden mit atomaren Schichten wird im allgemeinen vermieden, da durch das Beschießen der Kathoden mit den Primärelektronen leicht die adsorbierten Atome von der Oberfläche abgetrommelt werden. Die Folge davon ist eine ungenügende Lebensdauer. Außerdem sind die fabrikationstechnischen Schwierigkeiten bei der Herstellung vielstufiger Vervielfacher, die sich daraus ergeben, daß die optimale Bedeckung nicht gleichmäßig bei allen Teilkathoden erreicht wird, nicht zu unterschätzen. Für technische Zwecke eignen sich Kathoden besser, die aus einer kompakten Schicht eines Halb- oder Nichtleiters oder einer Legierung bestehen. Zu beachten ist, daß für die Messung des Sekundäremissionskoeffizienten der Nichtleiter eine besondere Meßmethode angewandt werden muß, die darauf beruht, daß man an Stelle des Leitungsstromes den Verschiebungsstrom benutzt¹⁰⁷⁾.

e) Sekundäremission von Cäsiumoxydkathoden

Die Feststellung, daß die lichtempfindlichen Kathoden des Typs $[Ag]-Cs_2O$, Cs, Ag-Cs einen Sekundäremissionskoeffizienten $\delta > 2,5$ (bis zu 11) aufweisen, ließ einen Parallelismus zwischen lichtelektrischen

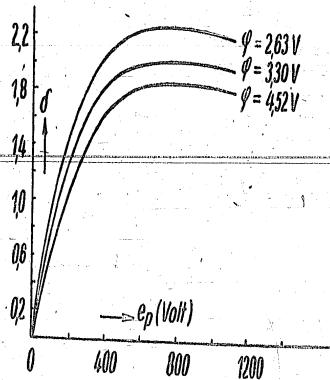


Abb. 37. Sekundäremissionsausbeute von W bei verschiedenen Bedeckungsgraden mit Th.

schter Emission und Sekundäremission vermuten. Eine Stütze dieser Vermutung war auch in dem hohen Sekundäremissionskoeffizienten ($\delta \sim 12$) der $[\text{Ag}]$ — Sb , Cs — Cs -Kathode zu sehen. Genauere Untersuchungen der Cs_2O -Kathoden zeigten jedoch bald, daß die Bedingungen, höchste Sekundäremissionsausbeuten zu erzielen, nicht mit denen übereinstimmen, die notwendigerweise zur höchsten lichtelektrischen Ausbeute führen. Wird nämlich aus einer Cs_2O -Kathode durch thermische Behandlung Cs ausgetrieben, so zeigt sich das Maximum der Sekundäremission bei geringerem Cs -Gehalt als das Maximum der lichtelektrischen Empfindlichkeit. Günstigste Bemessung der Ag - und Cs -Konzentration in der Zwischenschicht und richtige Wahl der Unterlage führt zu einem $\delta \sim 11$. Da überdies die Beschaffenheit der Kathodenoberfläche, wie dies auch nach den Erörterungen der vorhergehenden Abschnitte nicht anders zu erwarten ist, keinen ausschlaggebenden Einfluß auf das Sekundäremissionsvermögen ausübt, kann ein Parallelismus zwischen Sekundäremission und lichtelektrischer Emission nicht angenommen werden. Anwendung finden die Cs_2O -Schichten als Sekundäremissionskathoden zweckmäßig in Vervielfachern geringer Stufenzahl, da wegen der schwierigen Dosierung in Vervielfachern mit großer Stufenzahl serienmäßig bisher nur im Mittel $\delta = 2,5$ bis $2,7$ erreicht worden ist.

f) Sekundäremission von Legierungen

Günstiger verhalten sich für eine fabrikationsmäßige Ausnutzung die Legierungsschichten. Neben den Sb , Cs — Cs -Schichten haben sich besonders die Ag , Mg -Legierungen mit 3 % Mg und 97 % Ag bewährt¹⁰⁸. Werden diese Legierungen bis 450°C erhitzt, so steigt ihr Sekundäremissionskoeffizient auf Werte zwischen 15 und 16 bei einer Spannung e_p von ~ 500 Volt. Einen ähnlich hohen Sekundäremissionskoeffizienten ($\delta = 14$) weisen Ni , Be -Legierungen mit geringem Be -Gehalt auf¹⁰⁹. Im letzten Falle scheinen Spuren von Sauerstoff den hohen Wert von δ herbeizuführen. Für die beiden letztgenannten Legierungsschichten hätte man nach den früheren Anschauungen vom Parallelismus zwischen Sekundäremission und lichtelektrischer Emission ein hohes Sekundäremissionsvermögen nicht erwartet, weil eine lichtelektrische Empfindlichkeit dieser Legierungen im sichtbaren Spek-

tralbereich nicht nachweisbar ist. Nach SCHIETTI¹⁰³) lassen sich die Sekundäremissionskoeffizienten Cs -freier Legierungen (z. B. der Ag , Mg -, Cu , Be , Ag , Be - und Ag , Al -Legierungen) wesentlich durch Anlagerung von Cs -Spuren steigern.

Sowohl für die technische Ausnutzung der hohen Sekundäremission von Sb , Cs -Kathoden als auch zur Klärung der Sekundäremission an sich ist die Frage der günstigsten Schichtdicke von Bedeutung, denn ebenso wie bei den Metallaufladungsschichten (vgl. ¹⁰²) erwartet man für den Sekundäremissionskoeffizienten δ zusammengesetzter Schichten eine Abhängigkeit von der Schichtdicke. In der Tat dürfte die günstigste Schichtdicke bei $\sim 100 \text{ m}\mu$ liegen¹¹⁰).

g) Sekundäremission von Verbindungen

Die Zahl der bisher untersuchten Verbindungen läßt sich bequem in zwei Gruppen aufteilen, von denen die eine diejenigen Verbindungen enthält, deren Sekundäremissionskoeffizient $\delta < 2$ ist, hingegen die andere alle jene Verbindungen mit einem Sekundäremissionskoeffizienten $\delta > 2$. In Tab. 13 ist einiges Material zusammengetragen.

Tab. 13. Sekundäremissionskoeffizienten einiger Verbindungen

Verbindung	δ	Verbindung	δ
a) $\delta < 2$			
WS_2	1,04	Cu_2O	1,25
MoS_2	1,10	MoO_2	1,25
Ag_2O	1,20		
b) $\delta > 2$			
CaF_2	3,15	Cs_2O , Ag (dünne Schicht)	7,2
MgF_2	4,1	MgO	7,5
Cs_2O , Au , Ag (dicke Schicht)	4,5	Ag_2O , Ni	9,0
BaO	4,8—6,5	BeO , Ni	12,0
NaJ	5,5	KJ , Cs	12,6
LiF	5,6	CsCl , Cs	13,7
KJ	5,6	Ag_2S , Cs	17,5
RbCl	5,8	NaCl , Cs	22,7
NaCl	6,8		

94 Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden

Die Sekundäremissionsausbeuten der Verbindungen mit $\delta < 2$ sind nur wenig von Fremdmetalleinlagerungen abhängig, besonders wenn Schwermetalle eingelagert werden. Ein Vergleich der beiden Verbindungsgruppen lehrt, daß offenbar eine Verbindung immer dann einen Sekundäremissionskoeffizienten $\delta > 2$ aufweist, wenn das Gitter der Verbindung elektropositive Metalle enthält. Die meisten der Verbindungen, die keine gesonderten Fremdmetallatome aufweisen, sind als Überschußhalbleiter festgestellt und besitzen als Störstellen die Metallatome der Verbindung¹¹¹.

Um serienmäßige Vervielfacher mit großer Stufenzahl herzustellen, eignen sich die in Tab. 13b angegebenen Verbindungen mit extrem hohem Sekundärkoeffizienten nicht. Bei Beschuß mit Primärelektronen nimmt die Sekundäremission ab. Man wählt besser die Oxyde, deren Sekundäremissionskoeffizient wesentlich tiefer liegt, wie BaO oder auch MgO¹¹²). Ihr Verhalten ist stabiler.

§ 3. Feldemission

a) Einfluß der Kathodenform

Die zur Erzeugung einer Feldemission notwendigen hohen Feldstärken werden gewöhnlich durch eine besondere Form der Kathode, etwa durch Spitzen, erreicht. Gemessen an der Zahl der Untersuchungen aller anderen betrachteten Emissionsarten liegen über die Feldemission nur wenige orientierende Messungen vor. Man versucht in fast allen Entladeröhren die Feldemission durch Vermeiden von Spitzen und Kanten zu unterbinden, weil sonst dauernde Feldemissionsströme fließen oder sogar ein Vakuumdurchschlag erfolgt, falls für die Feldemission günstige äußere Widerstandsverhältnisse vorliegen.

b) Adsorptionsschichten

Die Feldemission hängt wesentlich von der Reinheit der Oberfläche ab, so daß es nahe lag, vornehmlich Metalloberflächen mit adsorbierten elektropositiven Metallatomen auf ihre Eigenschaften hinsichtlich der Feldemission zu untersuchen bzw. diese Kathoden, nachdem sich ihre guten Emissionseigenschaften in bezug auf ihre Feldemission erwiesen hatten, zur experimentellen Prüfung der wellenmechanischen

§ 3. Feldemission

95

Theorie (III, §3) zu verwenden¹¹³). Untersucht wurden dabei Kathoden aus W mit adsorbiertem Cs oder Ba sowie Kathoden aus W oder Mo mit adsorbiertem Th. Alle Untersuchungen einschließlich derjenigen, die zur Messung der Energieverteilung*) der Feldelektronen angestellt worden sind¹¹⁴), haben die Gültigkeit der wellenmechanischen Überlegungen bisher bestätigt. Aus diesen Untersuchungen ergibt sich gleichzeitig, daß in Entladegefäßen, die mit hohen Spannungen betrieben werden und bei denen die Feldemission unterbunden werden muß (etwa Bildwandler oder Speicherrohre mit Vorabbildung), jegliche Adsorption elektropositiver Metalle (Cs u. ä.) an nichtgewünschten Stellen (z. B. Systemteilen) vermieden werden muß.

c) MALTER-Effekt

Wird eine Al-Platte elektrolytisch oxydiert und darauf mit Cs beschickt, so entsteht ein Schichtenaufbau, der schematisch durch das Symbol $[Al]-Al_2O_3-Cs_2O$, Cs gekennzeichnet ist. Beschießt man diese Schicht mit Elektronen hoher Geschwindigkeit, so kann unter Anlegen eines genügend hohen Absaugfeldes ein Elektronenstrom gezogen werden, der bis zum 10^3 fachen größer als der Primärstrom ist. Der Effekt (MALTER-Effekt) ist trügheitsbehaftet, d. h. unter dem Beschuß mit Primärelektronen steigt der austretende Elektronenstrom erst nach einer bestimmten Zeit auf den maximalen Wert, und nach Unterbrechung der Primärstrahlung fällt der Emissionsstrom ebenfalls erst langsam ab. Die Emission wird jedoch sofort unterbrochen, wenn das absaugende Feld verschwindet¹¹⁵). Durch eine Anzahl verschiedenartiger Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß der MALTER-Effekt auf einer Feldemission beruht¹¹⁶). Die Cs_2O , Cs-Schicht gibt mehr Elektronen ab, als primär einfallen, und wird dadurch positiv gegen die Al-Schicht aufgeladen. Die Al_2O_3 -Zwischenschicht wirkt

*) Um Klarheit zwischen dem bereits mehrfach benutzten Begriff der Geschwindigkeitsverteilung und dem der Energieverteilung zu schaffen, sei festgestellt, daß für die Geschwindigkeitsverteilung $dN/dv = f_1(v)$ gilt, wenn dN die Zahl der Elektronen bedeutet, deren Geschwindigkeiten zwischen v und $v + dv$ liegen, und für die Energieverteilung $dN/dE = f_2(E)$, wenn dN die Zahl der Elektronen angibt, deren Energien im Energieintervall E und $E + dE$ liegen. Wegen der Gültigkeit der Gleichung $dE = mvdv$ kann man aus der Geschwindigkeitsverteilungskurve durch Multiplikation der Abszissenwerte und Division der Ordinatenwerte mit mv die Energieverteilungskurve gewinnen.

96 Vergleichende Betrachtungen zwischen lichtelektrischen Kathoden

als Isolator. Die Cs-Ionen werden nur langsam wieder neutralisiert. Läßt man den Primärelektronenstrom einen hinreichend hohen Wert erreichen, so wird die Aufladung mit der Zeit so groß, daß eine Feldemission von der Al-Platte einsetzt. Zwischen der Cs_2O , Cs-Schicht und der Al-Platte bildet sich ein elektrisches Feld von etwa 10^6 Volt/cm aus.

Die Al_2O_3 -Schicht kann auch durch eine andere Substanz, z.B. SiO_2 ¹¹⁷), ersetzt werden, wie überhaupt durch besondere Versuchsbedingungen dem MALTER-Effekt gleiche Entladeformen angegeben werden können¹¹⁸). Technische Anwendung hat der MALTER-Effekt bisher noch nicht gefunden. Es wurde lediglich versucht, die Sekundäremissionserscheinungen an Stoffen mit hohem δ durch eine Art „Trägheitslosen MALTER-Effekt“ zu erklären¹¹⁹).

VI. Abschnitt

Aufbau und Herstellung von Zellen
nach dem inneren lichtelektrischen Effekt

§ 1. Alkalihalogenide

Obwohl technische Zellen, die als lichtempfindliche Substanzen Alkalihalogenide besitzen, noch nicht bekannt sind, soll trotzdem auf die Herstellung von Alkalihalogenidkristallen kurz eingegangen werden, weil die Untersuchungen an diesen Kristallen vor allem von der POHLSchen Schule zu wichtigen Erkenntnissen auf dem Gebiete des inneren lichtelektrischen Effektes geführt haben und weil die begründete Aussicht besteht, in Zukunft auch eine Zelle auf dieser Grundlage zu schaffen. In Kapitel II, § 4b wurde schon das Wichtigste an Erkenntnissen, gewonnen an $\text{KH}-\text{KBr}$ -Mischkristallen, welches die Primär- und Sekundärströme beim inneren lichtelektrischen Effekt betrifft, erwähnt.

a) Reine Alkalihalogenidkristalle

Als Ausgangsprodukt dient üblicherweise ein reiner Alkalihalogenidkristall, der sich aus dem Schmelzfluß ziehen läßt. Nach Angaben von KYROPOULOS¹²⁰) lassen sich kleine Einkristalle herstellen, die ihrerseits als Keime für das Züchten beliebig großer Kristalle zu verwenden sind. An einem wassergekühlten Halter wird ein solcher Keim in die Schmelze des Salzes eingetaucht, und schon nach wenigen Stunden hat sich ein großer Kristall gebildet, der sich leicht für lichtelektrische Untersuchungen in Plattenform durch Abspalten in Richtung der Würfelebene bringen läßt.

Die reinen Alkalihalogenide sind vom langwelligen Ultrarot bis zu einer ultravioletten Absorptionsgrenze durchlässig. Für eine Absorptionskonstante*) $K = 1 \text{ mm}^{-1}$ können die Absorptionsgrenzen einer Anzahl von Alkalihalogeniden der Tab. 14 entnommen werden.

$$*) K = \frac{1}{D} \cdot \ln \frac{\Phi_0}{\Phi} (\Phi_0 \text{ auffallendes, } \Phi \text{ durchfallendes Licht, } D \text{ Plattendicke})$$

Görlich, Die lichtelektrischen Zellen

98 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem inneren lichtelektr. Effekt

Tab. 14. Absorptionsgrenzen λ_0 einiger Alkalihalogenide

Verbindung	λ_0 in μ	Verbindung	λ_0 in μ
RbCl	184	KJ	235
RbBr	215	NaF	132
RbJ	240	NaCl	170
KCl	175	NaBr	206
KBr	202	NaJ	248

Im Gebiete der Eigenabsorption, also unterhalb λ_0 , erreicht K Werte, die in der Größenordnung der Metallabsorption liegen. Die Spektren der Eigenabsorption weisen scharfe Frequenzen, auch Dispersionsfrequenzen genannt, auf, von denen die langwelligste von HILSCH und POHL nachfolgende Deutung erfahren hat. Die Lage der langwelligsten Eigenfrequenz ist gegeben durch die Gleichung

$$h\nu = E - J + M \frac{e^2}{d}, \quad (62)$$

worin E die Elektronenaffinität des Halogenions, J die Ionisierungsarbeit des Alkalions, $M \frac{e^2}{d}$ der elektrostatische Teil der Gitterenergie und M die MADELUNGSCHE Konstante bedeuten. Danach wird durch die Absorption eines Lichtquants ein Elektron vom Halogenion zum Alkalion befördert. In einem reinen, d.h. störungsfreien Kristall wird die Wanderung der Elektronen nicht beobachtet, weil nach dem genannten Übergangsprozeß sofort der umgekehrte Vorgang eintritt. Nur in einem gestörten Kristall könnte die Bildung des freien Halogenatoms neben dem Alkaliatom festgestellt werden, weil nur in einem solchen Kristall eine Stabilisierung des Prozesses, wie überhaupt jedes photochemischen Prozesses, möglich ist.

b) Gestörte Kristalle, F-Zentren

Um einen gestörten Kristall zu erhalten, ist es z.B. möglich, einen stöchiometrischen Überschuß an Alkalimetall im Kristall zu schaffen, so daß durch Verminderung der Metalloidkomponente ein Überschußhalbleiter entsteht. Setzt man einen reinen Kristall bei hoher Temperatur dem Alkalidampf aus und kühl ihn rasch auf Zimmertemperatur ab oder läßt man mit Hilfe eines elektrischen Feldes Elektronen in den Kristall hineinwandern, so entstehen die sogenannten Farbzentren

§ 1. Alkalihalogenide

oder kurz *F*-Zentren. Träger dieser Farbzentren sind demnach die atomar verteilten überschüssigen Alkaliatome. Der Name „Farbzentrum“ wurde von POHL wegen der charakteristischen Verfärbung der Alkalihalogenidkristalle gewählt (verfärbtes RbCl blau, verfärbtes KCl violett, verfärbtes NaCl gelb). Die maximale Frequenz der entstehenden glockenförmigen Absorptionsbande hängt vom kleinsten Abstand d zwischen Kationen und Anionen im Kristallgitter ab, und zwar gilt

$$vd^2 = 5,02 \cdot 10^{-5} \text{ sec}^{-1} \text{ m}^2, \quad (63)$$

sofern es sich um Alkalihalogenide des Steinsalztyps handelt (in der Reihe der Chloride fällt CsCl wegen seines abweichenden Gittertyps aus). Im Höchstfalle kann eine Konzentration von 10^{18} *F*-Zentren im cm^3 erzielt werden. Die Konzentration ist proportional des bei der Herstellung herrschenden Alkalidampfdruckes. Die Messung der Konzentration der *F*-Zentren kann entweder auf elektrischem Wege geschehen, indem man bei hoher Temperatur unter Anlegen eines elektrischen Feldes die Farbzentren auf die Anode zu wieder auswandern läßt oder aber optisch, indem man nach der klassischen Dispersionstheorie die Gleichung

$$N = C H K \quad (64)$$

zur Anwendung bringt. H bedeutet die Halbwertsbreite der Zentrenbande und C eine Konstante, die für alle Alkalihalogenide $1 \cdot 10^{16}$ Volt/ cm^2 beträgt. Wendet man das elektrische Verfahren zur Konzentrationsbestimmung an, so ist, weil N positive Metallionen mit N eindiffundierten Elektronen N überschüssige Metallatome geben, aus dem gemessenen Elektronenstrom die Zahl der Elektronen und damit der überschüssigen Metallatome zu bestimmen. Es gilt

$$N = \frac{i D}{e_k Q e b}, \quad (65)$$

wobei i der Elektronenstrom, D der Elektrodenabstand, e_k die Spannung, Q der Querschnitt des Kristalls und b die Beweglichkeit der Elektronen bedeuten.

c) *F'*-Zentren

Den *F*-Zentren nahe verwandt sind die *F'*-Zentren, die sich von den *F*-Zentren dadurch unterscheiden, daß ihre Elektronen loser gebunden

100 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem inneren lichtelektr. Effekt

sind. Das Bandenmaximum der *F*-Zentren ist nach längeren Wellen verschoben. Die Erzeugung der *F*-Zentren erfolgt am einfachsten durch Lichtabsorption in den *F*-Zentren, wobei sich Elektronenströme leicht messbarer Größe ergeben. Dasselbe Ergebnis hinsichtlich der Elektronenströme erhält man bei der Rückbildung von *F*-Zentren aus *F*-Zentren, die durch Einstrahlung roten bzw. ultraroten Lichtes erfolgen kann.

d) *U*- bzw. *KH*-Zentren

Durch die leichte Löslichkeit des Wasserstoffes in Alkalihalogenidkristallen gelingt es leicht, einen *F*-zentrenhaltigen Kristall zu entfärben und die *F*-Zentren in *U*-Zentren (ältere Bezeichnungsweise) zu verwandeln. Die *U*-Zentren sind Alkalihydridmoleküle. Erhitzt man z. B. einen *F*-zentrenhaltigen KBr-Kristall im Wasserstoff bei 1 atm Druck¹²¹⁾, so entsteht ein KBr-KH-Mischkristall, dessen *U*-Bande ein Maximum bei 228 m μ aufweist. Die Konzentration der *U*-Zentren kann bis zu 10^{18} im cm³ betragen. Die lichtelektrischen Verhältnisse sind bereits in II, § 4 b gestreift worden.

e) Kristalle mit Halogenüberschuß und mit Fremdbeimengungen

Neben den Alkalihalogenidkristallen mit stöchiometrischem Alkaliüberschuß können ebenso solche mit einem Mangel an Alkalimetall hergestellt werden. Wird z. B. ein *KJ*-Kristall zwischen eine plattenförmige Elektrode und eine Spalte gebracht und ein elektrisches Feld so angelegt, daß die Spalte positiv wird, so entsteht ein Kristall mit einem stöchiometrischen Überschuß von neutralem Halogen.

Schließlich sei noch erwähnt, daß es möglich ist, dem Schmelzfluß der Kristalle geringe Beimengungen fremder Stoffe hinzuzufügen. Durch die Beimengung von Tl oder Cu wird der Kristall zum „Phosphor“, d. h. er strahlt Licht, welches in den Tl- bzw. Cu-Banden eingestrahlt wird, als längerwelliges Licht wieder aus.

f) Vergleichende Betrachtung über Silberhalogenidkristalle

Schon lange interessierte die Frage nach dem Zusammenhang zwischen dem lichtelektrischen und dem photographischen Effekt. Aufklärung hierüber brachten in erster Linie nicht die Untersuchungen an Alkalihalogenidkristallen, sondern die neueren Untersuchungen an

§ 1. Alkalihalogenide

101



Silberhalogenidkristallen¹²²⁾), die daher in diesem Rahmen kurz gestreift werden sollen.

Die reinen AgCl- und AgBr-Kristalle werden ebenfalls aus der Schmelze gezogen. Sie zeigen eine Eigenabsorption, die sich sehr viel weiter in das langwellige Gebiet (420 bzw. 500 m μ) hineinzieht als die der Alkalihalogenidkristalle. Außerdem fehlen die scharf ausgeprägten Eigenabsorptionsfrequenzen. Durch Einstrahlung von Licht im Eigenabsorptionsgebiet tritt eine schwache Verfärbung der Silberhalogenidkristalle auf. Die entscheidende *F*-Bande ist jedoch ebenso verwaschen wie das Eigenabsorptionsgebiet. Zum Unterschied zu den *F*-Zentren der Alkalihalogenide, die aus Metallatomen bestehen, werden die *F*-Zentren in den Silberhalogeniden aus kolloidalen Metallteilchen gebildet, weil einzelne Ag-Atome im Silberhalogenidgitter nicht beständig sind. Es müssen also bereits Ag-Teilchen vorhanden sein, wenn es zur Ag-Abscheidung kommen soll. Als bemerkenswert stellt sich dabei heraus, daß sich die Ag-Abscheidung praktisch nur auf der Kristalloberfläche vollzieht, woraus folgt, daß die Abscheidung von der Beschaffenheit der Oberfläche stark abhängig ist. Die kolloidalen Metallteilchen bestehen aus $\sim 10^7$ Ag-Atomen. Im Gitter der reinen Silberhalogenidkristalle selbst, kann also ebensowenig wie in den reinen Alkalihalogenidkristallen eine Stabilisierung eines photochemischen Prozesses beobachtet werden.

Um eine wirkliche Photochemie zu ermöglichen, muß wie im Falle der Alkalihalogenide das Gitter der Silberhalogenide gestört sein. Die Störung kann etwa durch Zusatz von $\sim 10^{-2}\%$ Ag₂S hervorgerufen werden. Man löst Ag₂S in der Schmelze der reinen Silberhalogenide und läßt die Schmelze abkühlen. Der Zusatz von Ag₂S bewirkt nicht das Auftreten einer neuen Bande wie etwa der *U*-Bande, sondern macht sich als langwelliger Ausläufer der Eigenabsorption bemerkbar. Die größtmögliche Ag-Menge, die sich durch Belichtung abscheiden läßt, entspricht größtenteils der Menge des im Kristall befindlichen Ag₂S. Man kann das gebildete kolloidale Ag durch Erhitzen des Kristalls auf $\sim 300^\circ\text{C}$ wieder verschwinden lassen, so daß der Kristall seine ursprüngliche Lichtempfindlichkeit erhält. Ein weiterer bemerkenswerter Unterschied zwischen den gestörten Alkalihalogenidkristallen und den Silberhalogenidkristallen mit Zusatzabsorption be-

102 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem inneren lichtelektr. Effekt

steht darin, daß bei den letzteren nicht eine Photodissoziation des Zusatzes angenommen werden darf, sondern ein noch nicht klar erkannter andersartiger Mechanismus.

Obwohl noch in einigen weiteren Arbeiten gute Ergebnisse an Silberhalogeniden, teilweise nach Kenntnis der STASIW-TELROWSchen Arbeiten, erzielt wurden¹²³⁾, konnten technische Widerstandszellen noch nicht hergestellt werden. Insbesondere in bezug auf das System AgBr-PbS¹²⁴⁾ sind aber Erfolge zu erwarten.

§ 2. Kupferoxydul

a) Allochromatische und idiochromatische Kristalle

In VI, § 1a konnte am Beispiel der Alkalihalogenide gezeigt werden, daß Kristalle, von GUDDEN und POHL „allochromatische Kristalle“ genannt, existieren, die im reinen Zustand lichtelektrisch inaktiv sind. Diesen gegenüber stehen die „idiochromatischen Kristalle“, die bei Lichteinstrahlung im Gebiete ihrer Eigenabsorption bereits einen lichtelektrischen Strom liefern. Sie sind im allgemeinen dadurch ausgezeichnet, daß ihr Brechungsindex hoch liegt, etwa > 2 ist. Neben vielen Sulfiden, Oxyden und Halogeniden fallen hierunter Selen, Schwefel, Diamant, Jod und gelber Phosphor. Es handelt sich also a) um Isolatoren und b) um Halbleiter, die bereits im Dunklen Leitfähigkeit zeigen. Fast bei allen älteren Untersuchungen an idiochromatischen Kristallen wurde auf eine sorgfältige Trennung der Primär- und der Sekundärströme wenig oder überhaupt nicht geachtet. Aber gerade bei den idiochromatischen Kristallen ist eine sorgfältige Trennung der beiden Effekte notwendig, um den wirklichen lichtelektrischen Effekt zu erkennen.

Für die spektrale Verteilung der Primärströme aller dieser Kristalle gilt, daß das Maximum der spektralen Verteilung bei den Wellenlängen liegt, bei denen die Lichtabsorption der Kristalle stark ansteigt. Im Gebiete stärkster Absorption ist kein lichtelektrischer Effekt feststellbar. Ob, wie es verschiedentlich angenommen worden ist, der langwellige Ausläufer der Absorptionsbande von Störstellen herrührt (vgl. z. B. VI, § 1f) und nur durch diese eine lichtelektrische Wirkung

§ 2. Kupferoxydul

103

hervorgerufen wird oder welche andere Deutung herangezogen werden muß, bedarf noch der Klärung.

b) Die lichtelektrischen Verhältnisse am Kupferoxydul

Obwohl eine technische Zelle auch aus Kupferoxydul (Cu_2O) nicht bekannt ist, wenn man von BECQUEREL-Zellen absieht, soll Cu_2O behandelt werden, weil dieses Material sauber auf seinen Primäreffekt untersucht worden ist¹²⁵⁾ und in Zukunft vermutlich bei der Zellenherstellung Anwendung finden wird. Wie man aus Tab. 2 (II, § 1f) ersieht, zählt Kupferoxydul mit Sauerstoffüberschuß zu den Ersatzhalbleitern. Man wird daher mit einer Abhängigkeit der spektralen Verteilung des Primäreffektes vom Sauerstoffgehalt rechnen müssen.

Die Kupferoxydulplatten gewinnt man am einfachsten durch Oxidation entsprechender Cu-Platten¹²⁶⁾ (vgl. auch VII, § 1d). Dampft man als Elektroden Ag auf die Endflächen, so können Sperrwirkungen an den Übergangsstellen nicht auftreten.

Eine typische spektrale Verteilung ist in Abb. 38 wiedergegeben. Das Maximum bei $630 \text{ m}\mu$ liegt an der Absorptionskante des Cu_2O ; das Maximum bei $800 \text{ m}\mu$ gehört unbekannten Verunreinigungen (möglicherweise Cu-Atomen) an, während das dritte Maximum bei $2 \text{ }\mu$ dem Sauerstoffüberschuß zugeschrieben werden muß. Beide Maxima sowohl bei $800 \text{ m}\mu$ als auch bei $2 \text{ }\mu$ sind von Kristall zu Kristall verschieden stark ausgeprägt, entsprechend dem wechselnden Gehalt an Verunreinigungen und an Sauerstoff. Die Ergebnisse sind am Einkristall die gleichen wie an Kristalliten. Zum Vergleich mit der spektralen Verteilung des reinen Primäreffektes ist in Abb. 39 die spektrale Ver-

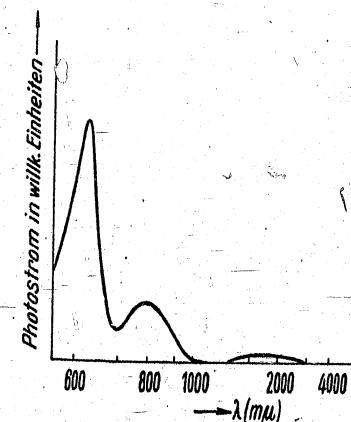


Abb. 38. Spektrale Verteilung des lichtelektrischen Primäreffektes von Cu_2O .

reinigungen und an Sauerstoff. Die Ergebnisse sind am Einkristall die gleichen wie an Kristalliten. Zum Vergleich mit der spektralen Verteilung des reinen Primäreffektes ist in Abb. 39 die spektrale Ver-

siert nichtleitendes, rotes Se aus, eine dritte kristalline Modifikation, die jedoch zur Zellenherstellung nicht verwendet wird.

Man wird meinen, daß das eleganteste Verfahren, die Selenschicht herzustellen, im Aufdampfen oder Aufstäuben besteht. Da aber die günstigste Schichtdicke in der Größenordnung $10-50 \mu$ liegt, wird im allgemeinen die Selenschicht durch Auftragen und Schmelzen amorphen Selens hergestellt. Beim Erstarren der Schmelze entsteht zunächst ein amorph-glasiger Zustand, so daß es notwendig ist, einen Sensibilisierungsprozeß anzuschließen, unter dem man einen Erhitzungsvorgang zwecks Überführung des Se in eine kristalline Modifikation versteht. Der Erhitzungsprozeß ist verantwortlich für die Eigenschaften der Zelle. Es entsteht ein Gemisch der grauschwarzen und der grauen Modifikation, so daß die elektrische Leitfähigkeit nach den Anteilen der beiden Modifikationen variiert ebenso wie die Empfindlichkeit, die beim Überwiegen der grauschwarzen Modifikation größer wird. Es liegen Versuche vor, die es möglich erscheinen lassen, daß Spuren roten Selens die lichtelektrischen Eigenschaften der grauen Modifikationen hervorrufen¹²⁰). Gute elektrische Leitfähigkeit und hohe Empfindlichkeit sind beides erwünschte Faktoren; sie schließen sich jedoch gegenseitig aus.

Die Angabe der günstigsten Schichtdicke von $10-50 \mu$ stellt einen Kompromiß dar; je dünner die Schicht ist, um so geringer die Trägheit, um so schlechter aber die elektrische Leitfähigkeit. Außerdem kann bei dünnen Schichten ($<10 \mu$) durch Erhitzen die Bildung von Kristallen nicht mehr erwartet werden. Metallzusatz zum Selen, beispielsweise von Ag (bis zu 0,3%), soll ein Mittel sein, ebenfalls die Trägheit der Zelle herabzusetzen. Als isolierende Unterlagen kommen in Betracht Glas, keramische Massen, oxydiertes Al, Glimmer u.ä. Besonders dürften sich neuerdings keramische Massen empfehlen, in die die Elektrodenraster (vgl. IX, § 35) eingearbeitet werden können. Die wichtigste Forderung, die an die Unterlage gestellt wird, ist die nach Vermeidung unkontrollierbarer chemischer Reaktionen mit dem lichtempfindlichen Material, in diesem Falle des Se.

Eine Beeinflussung des Widerstandes, die für technische Selenwiderstandszellen oftmals wünschenswert sein kann, kann man erreichen, wenn man dem Selen bei der Schmelze Wismuttrijodid oder

Zirkontetrachlorid zusetzt. Systematische Untersuchungen darüber, welche Substanzen an Stelle der genannten bzw. noch zusätzlich zu den genannten zugesetzt werden könnten, dürften noch manche interessante Tatsache zutage fördern (vgl. auch die ähnlich liegenden Verhältnisse bei Selen-Sperrsichtzellen, VII, § 2).

c) Spektrale Verteilung von Selenwiderstandszellen

Die spektrale Verteilung einer technischen Selenzelle kann der Abb. 40 entnommen werden. Es zeigt sich, daß je nach der Beleuchtungsstärke die Maxima verschieden stark ausgeprägt sind (insbesondere nach Untersuchungen von PFUND). Bei kleinen Beleuchtungsstärken (Kurve b) erkennt man nur eine Andeutung eines Maximums um die Wellenlänge $700 \text{ m}\mu$ herum. Hingegen heben sich bei größer werdender Beleuchtungsstärke (Kurve a) zwei Maxima immer deutlicher heraus, einmal ein rotes ($700 \text{ m}\mu$) und zum anderen ein grünes, flacheres (550 bis $600 \text{ m}\mu$). Das zweite Maximum wird von verschiedenen Forschern auch oft in der Gegend um $500 \text{ m}\mu$ herum angegeben.

Die Abb. 40 bietet den Schlüssel zum Verständnis dafür, daß der Exponent a in Gleichung (66) eine Funktion der Wellenlänge darstellt.

§ 4. Selen-Tellur

a) Zusatz von Tellur zum Selen

Ein besonderer Erfolg wird durch Zusatz von Tellur zum Selen erreicht. Während reines Te kein geeignetes Material für die Zellenherstellung abgibt, ist durch Tellurzusatz zum Se eine Verschiebung der

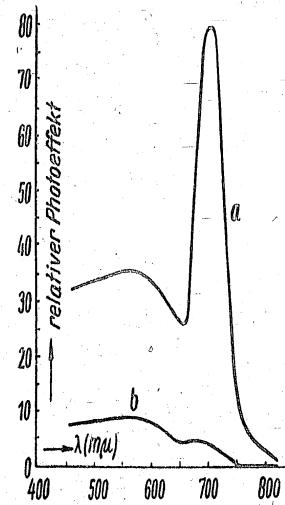


Abb. 40. Spektrale Verteilung einer Selenzelle bei zwei verschiedenen Beleuchtungsstärken.

110 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem inneren lichtelektr. Effekt

Um die Schichten, und zwar auch die Selen- wie die Selen-Tellur-schichten, nicht den wechselnden atmosphärischen Verhältnissen so wie willkürlichen Feuchtigkeits-, Fett- und sonstigen Einflüssen auszusetzen, werden die Schichten entweder mit Schutzlacküberzügen versehen oder in evakuerte oder mit inertem Gas gefüllte Kolben eingeschmolzen.

b) Spektrale Verteilung der Thalliumsulfidzellen

Die Ultrarotempfindlichkeit der Thalliosulfidzellen ist in Abb. 42 wiedergegeben¹³³). Die Lage des Maximums bei $\sim 1 \mu$ ist charakteristisch für Thalliosulfid.

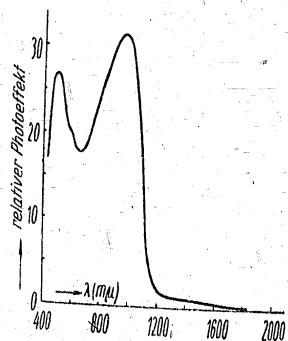


Abb. 42. Spektrale Verteilung einer Thalliosulfidzelle.

In der Literatur der letzten Jahre ist oft von einer Wismut-Sulfidzelle die Rede gewesen, die eine Empfindlichkeit bis in die Gegend von 7μ besitzen soll. Es dürfte sich wohl in der Zwischenzeit herausgestellt haben, daß der im langwelligsten Gebiet gemessene Effekt als ein thermoelektrischer anzusehen ist.

§ 6. Bleisulfid und andere Substanzen zur Herstellung technischer Widerstandszellen

a) Herstellung von Bleisulfidzellen

Die im später folgenden Abschnitt VIII (§ 1 und § 2) beschriebenen Zellen aus natürlichem Bleiglanz legten es nahe, Widerstandszellen aus künstlichem Bleisulfid herzustellen. Während man alle Vorteile der Bleiglanzzellen (also der Zellen aus natürlichen Kristallen), insbesondere in bezug auf die spektrale Verteilung, auch für die Blei-

§ 6. Bleisulfid und andere Substanzen

111

sulfidzellen (der Zellen aus künstlich hergestelltem PbS) erwarten konnte, mußte überdies durch die Unabhängigkeit von den zufälligen atomaren Beimengungen, die wohl jeder natürliche Kristall aufweisen wird, eine bessere Möglichkeit seriennässiger Herstellung von Zellen gegeben sein, ganz abgesehen davon, daß man auch neue Erkenntnisse für den lichtelektrischen Effekt erhalten würde.

Es zeigte sich, daß grundsätzlich zwei Wege zur Herstellung von PbS-Zellen eingeschlagen werden können, einmal kann das Ziel auf chemischem Wege durch chemisches Niederschlagen einer PbS-Schicht erreicht werden (KUTZSCHER) und zum anderen auf physikalischem Wege durch Aufdampfen von PbS im Vakuum (GUDDEN und TREU).

Bekanntlich fällen Schwefelwasserstoff oder Schwefelammonium aus Lösungen, die Bleion enthalten, Bleisulfid aus, wobei es jedoch nicht zur Spiegelbildung kommt. PbS-Spiegel erhält man, indem man Lösungen von Thioharnstoff, Bleiazetat und Natronlauge im Verhältnis 1:3:1 mit 4 Teilen Wasser zur Reaktion bringt¹³⁴⁾. Auf diesem Wege hergestellte Schichten werden in Vakuumgefäß eingebracht und im Sauerstoff formiert. Wie im Falle der Thalliumsulfidzellen (VI, § 5a) ist der Sauerstoff notwendig, um die lichtelektrische Empfindlichkeit hervorzurufen. Bisher gelang es nicht, Zellen auf chemischem Wege herzustellen, die bei Zimmertemperatur technisch brauchbar sind, vielmehr muß die Zellenkonstruktion so durchgeführt sein, daß Kühlung mit Kohlensäureschnee möglich ist. Dies ist der wesentlichste Grund, warum sich der Einbau der Schichten in Vakuumgefäß erforderlich macht.

Das zweite Verfahren, das Aufdampfen des PbS im Vakuum, setzt bestes Vakuum und Heizen der zu bedampfenden Unterlage (in fast allen Fällen Glas oder Quarz) auf etwa 250°C voraus¹³⁵⁾. Die nachfolgende Oxydation geschieht an Luft in einem gewöhnlichen Heizofen bei einer Temperatur von 550°C. Nach dem Aufdampfverfahren hergestellte Zellen können seriennässig ebenso im gekühlten wie auch bei normalen Temperaturen technische Verwendung finden (seriennässige Entwicklung von GÖRLICH und LANG)¹³⁶⁾.

Die bisher an PbS-Schichten angestellten Versuche haben im wesentlichen zwei Hinweise gegeben, mit deren Hilfe eine Einsicht in die

e) Weitere für die Herstellung technischer Zellen geeignete Substanzen

Die Erfolge in der Erforschung der Halbleiter sind der Grund, warum die Zahl der Arbeiten, in welchen über den inneren lichtelektrischen Effekt an verschiedenen Materialien berichtet wird, wieder angewachsen ist. Außerdem bieten die erzielten Erfolge mit PbS im ultraroten Gebiet Anreiz, weitere Steigerungen der Ultrarotempfindlichkeit hervorzurufen.

Die bisher rotempfindlichsten Zellen wurden mit PbSe (KUTZSCHER-SOMMER-PICK) und PbTe (HERTZ-KRENZIEN)¹⁴² erhalten [vgl. auch¹⁴³]. Beide Zellenarten geben bisher nur im gekühlten Zustande technisch brauchbare Werte der Empfindlichkeit. Mit fallender Temperatur wächst die Empfindlichkeit, und die langwellige Grenze schiebt sich weiter ins ultrarote Gebiet vor. Als Beispiel seien wiederum neuere Messungen angeführt¹⁴³.

Temperatur der Schicht in °K	λ_0 in μ für PbSe	λ_0 in μ für PbTe
195	4,2	4,4
90	5,6	5,7
20		6,4

Die PbSe- sowie die PbTe-Zellen sind durch Aufdampfen im Vakuum, ähnlich dem Verfahren für PbS-Zellen, erhalten worden. Man sieht, daß hinsichtlich der langwelligen Grenze ein bedeutender Fortschritt mit PbTe gegenüber PbSe noch nicht zu erzielen war. Wie MILNER und WATTS¹⁴⁴ bewiesen haben, können auch PbSe-Schichten als Spiegel chemisch aus Lösungen von Bleiazetat und Selenharnstoff analog der PbS-Spiegelbildung (Bleiazetat und Thioharnstoff, vgl. VI, § 6a) gewonnen werden. Es erweist sich als zweckmäßig, die Unterlage, die die PbSe-Schicht tragen soll, zuvor mit PbS-Mikrokristallen zu impfen, indem man auf der Unterlage einen äußerst dünnen PbS-Film chemisch erzeugt. Die PbSe-Schicht bildet sich sehr viel langsamer als die PbS-Schicht. Analog dem Formierprozeß des PbS muß man auch die PbSe-Schicht einem Oxydationsprozeß (10 bis 15 min bei 300°C) unterwerfen. Die spektrale Verteilung zeigt alsdann ein breites Maximum zwischen 3 und 4 μ , wenn die Schicht mit flüssiger Luft gekühlt wird.

Die Verbindungen des Cadmiums mit S, Se und Te zeigen, wie FRERICHS¹⁴⁵) für CdS und GÖRLICH und HEYNE¹⁴⁶) für CdSe und CdTe nachwiesen, gute lichtelektrische Empfindlichkeit, die sich besonders für CdSe durch Temperung im Sauerstoff stark steigern läßt. Die Lage der langwelligen Maxima wurde festgestellt für CdS bei $\sim 520 \text{ m}\mu$, für CdSe bei $\sim 740 \text{ m}\mu$ und CdTe bei $\sim 850 \text{ m}\mu$. Es zeigt sich die Gesetzmäßigkeit, daß die Selenide rotempfindlicher als die entsprechenden Sulfide und die Telluride wiederum rotempfindlicher als die entsprechenden Selenide sind (vgl. auch die Ergebnisse an InS und InSe¹⁴⁷), λ_{max} für InSe bei $\sim 1,1 \mu$, λ_0 bei $\sim 1,8 \mu$). Die Empfindlichkeiten der CdS- und CdSe-Widerstandszellen liegen über $10^4 \mu \text{A/lm}$ [vgl. auch¹⁴⁸]. Diese Art der Zellen wird daher eine gewisse technische Bedeutung erlangen.

Bemerkenswert sind auch die hohen Empfindlichkeiten, die man an Bleichromat-Einkristallen erhalten kann¹⁴⁹). Gepreßte und bei 450°C gesinterte Kristalle zeigen im sichtbaren Gebiet zwei Maxima ($\lambda_1 = 580 \text{ m}\mu$ und $\lambda_2 = 480 \text{ m}\mu$). Im Maximum λ_1 ergibt sich die Empfindlichkeit zu $5 \times 10^{-3} \text{ Amp/Watt}$.

Von den in diesem Absatz genannten Substanzen, die sich für die Herstellung technischer Widerstandszellen (und damit auch für die Herstellung von Sperrschiitzellen) eignen, sollte man besondere Aufmerksamkeit den Cd-Verbindungen widmen. Abgesehen davon, daß offensichtlich an diesen Substanzen besondere Widerstandsabhängigkeiten von der Temperatur zu beobachten sind¹⁴⁰ 150), kann man Cadmiumsulfidkristalle gewissermaßen als „Zähler“ bezeichnen, denn diese Kristalle zeigen eine Veränderung der Leitfähigkeit bei Bestrahlung mit α -Teilchen, Elektronen und γ -Strahlen, und zwar eine Verminderung der Leitfähigkeit, wenn die Kristalle vor der Bestrahlung einer UV-Belichtung ausgesetzt waren, hingegen eine Vergrößerung der Leitfähigkeit (bis zu vier Größenordnungen), wenn die Belichtung mit sichtbarem Lichte erfolgte. Sind die Kristalle nur schwach aktiviert, so ist strenge Linearität zwischen der von dem eingeschossenen Teilchen absorbierten Energie und der Leitfähigkeitsänderung gewährleistet. Im Regelfalle wird der Kristall auf zwei gegenüberliegenden Seiten dünn mit Al bedampft¹⁵¹).

Besonders aber sind die Versuche an CdS wichtig geworden, weil

116 Aufbau und Herstellung von Zellen nach dem inneren lichtelektr. Effekt

wie bereits in II, § 4c skizziert wurde, an Einkristallen von CdS die Anwendung des Bändermodells auf die Erscheinungen der inneren lichtelektrischen Leitung zum Erfolge führte¹¹⁾. Hinzu kommt noch, daß die Gesetzmäßigkeiten des inneren lichtelektrischen Effektes der Reihe CdS, CdSe und CdTe in Verbindung mit den für diese Substanzen bekannten optischen Konstanten (Brechungsindex) einen Zusammenhang nahelegte¹⁵²⁾, durch den MOSS zum Versuch angeregt wurde, Cd₃As₂ auf einen inneren lichtelektrischen Effekt hin zu untersuchen. Durch Reaktion der Komponenten im stöchiometrischen Verhältnis erhielt er eine bei 90° K lichtempfindliche Substanz, die ein langwelliges Maximum bei ~ 2 μ und eine langwellige Grenze bei ~ 2,8 μ aufweist.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, daß auch farbige Proteine ihren elektrischen Widerstand bei Belichtung herabsetzen¹⁵³⁾. Abgesehen davon, daß aus dieser Erkenntnis gewisse praktische Ergebnisse für die photographische Sensibilisierungstechnik folgen können (vgl. VIII, § 1d), dürften sich, wenn auch zunächst nur wissenschaftliche, Folgerungen und Erkenntnisse für biologische Phänomene ergeben. Man hat bereits einige biologische Phänomene erklären können durch die Annahme, daß eine Summe von Proteinriesenmolekülen Bänderleitfähigkeit wie die Halbleiter aufweisen. Der lichtelektrische Versuch zeigt nun, daß die Leitfähigkeitsänderung bei Belichtung nicht auf einzelne Mizellen beschränkt bleibt, woraus auf die Gültigkeit der Bänderleitfähigkeit auch für Proteinriesenmolekülanhäufungen geschlossen wird. Die Ausdehnung der lichtelektrischen Versuche auf lebende Systeme wird zeigen, ob die Zellwände die Ausdehnung der Bänder über diese hinaus verhindern.

Was den Hinweis auf die Folgerungen für die photographische Sensibilisierungstechnik betrifft, so dürften die Ergebnisse von WEST und CARROLL¹⁵⁴⁾ von noch entscheidenderer Bedeutung sein. Es wird nämlich nachgewiesen, daß für einige untersuchte und mit Farbsensibilisatoren versehene Silberbromidemulsionen die spektrale Verteilung der lichtelektrischen Leitfähigkeit parallel mit der spektralen Verteilung der photographischen Empfindlichkeit geht, und zwar übereinstimmend mit der Lichtabsorption. Der Photostrom folgt dem Gesetz (66), wobei $0,5 < \alpha < 1$ gilt.

Sieht man davon ab, nur praktische Erfolge durch Wahl anderer

§ 6. Bleisulfid und andere Substanzen

117

Substanzen erzielen zu wollen, so öffnet die Untersuchung des inneren lichtelektrischen Effektes in gewissen Fällen recht interessante Perspektiven in wissenschaftlicher Hinsicht. Als Beispiel sei die Untersuchung des inneren lichtelektrischen Effektes von Sb, Cs-Schichten (vgl. IV, § 4n) gewählt. Solche Schichten, mit Pt-Elektroden versehen, weisen einen inneren lichtelektrischen Effekt auf¹⁵⁵⁾, wie auch aus früheren Überlegungen und Untersuchungen anderer^{157/158)} zu erwarten war (vgl. IV, § 4i, t). Eigentümlicherweise aber zeigt sich der innere lichtelektrische Effekt im Gebiete von 0,8 bis 1,6 μ, in einem Gebiete also, in dem die Schicht keinen äußeren lichtelektrischen Effekt aufweist, denn die langwellige Grenze des äußeren lichtelektrischen Effektes liegt unterhalb 800 mμ, so daß zwischen dieser langwirigen Grenze und der kurzwelligen Grenze des inneren lichtelektrischen Effektes ein Bereich ohne Photoeffekt liegt. In diesem Falle läßt sich die Lage und die Breite des Leitfähigkeitsbandes in bezug auf die vollbesetzten Niveaus berechnen.

f) Supraleitende dünne Schichten

Dünne Schichten aus Pb und Sn sind bei tiefen Temperaturen, wie die massiven Metalle supraleitend. Sie unterscheiden sich aber von den massiven Metallen dadurch, daß für sie eine Grenzstromstärke charakteristisch ist, bei deren Überschreitung um nur 0,03% der supraleitende Zustand sofort zerstört wird. Eine Vernichtung des supraleitenden Zustandes kann jedoch auch erreicht werden, wenn man die Grenzstromstärke konstant erhält und eine Wärmestrahlung geringer Energie auffallen läßt¹⁵⁹⁾, d. h. man besitzt damit ein Mittel, geringste infrarote Strahlungsmengen nachzuweisen. Die Sprungtemperaturen T_s , bei denen eine Supraleitung einsetzt, liegen leider für die Metalle sehr niedrig (T_s für Pb z. B. bei 7,26 K). Versuchstechnisch günstiger liegen die Sprungtemperaturen der von JUSTI angegebenen Stickstoff-Verbindungen des Niobiums [die Sprungtemperaturen von NbN und Nb₂N finden man über 10° K (zwischen 16 und 23° K)], so daß man bereits mit flüssigem Wasserstoff arbeiten kann. In der Tat zeigen die genannten Verbindungen [sowie auch andere, vgl. 157)] in dünner Schicht den an dünnen Metallschichten gefundenen Effekt der Vernichtung der Supraleitung durch ultrarote Strahlung ebenfalls.

trägt $\sim 6 \text{ m}\mu$, für Au-bestäubte $\sim 10 \text{ m}\mu$ und für Ag-bestäubte $\sim 4 \text{ m}\mu$ (Durchmesser der Zelle 25–30 mm)¹⁵⁸). Auf die spektrale Verteilung der Vorderwandzellen hat die Wahl des aufgestäubten Elektrodenmaterials keinen Einfluß.

e) Spektrale Verteilungen der Cu_2O -Hinter- und Vorderwandzellen

Auf Grund der unterschiedlichen Lichtabsorptionsverhältnisse der Cu_2O -Hinterwand- und der Cu_2O -Vorderwandzellen ergeben sich auch Unterschiede zwischen ihren spektralen Verteilungen. Diese Tatsache beweisen die Abb. 43 und 44, in denen die spektralen Verteilungen

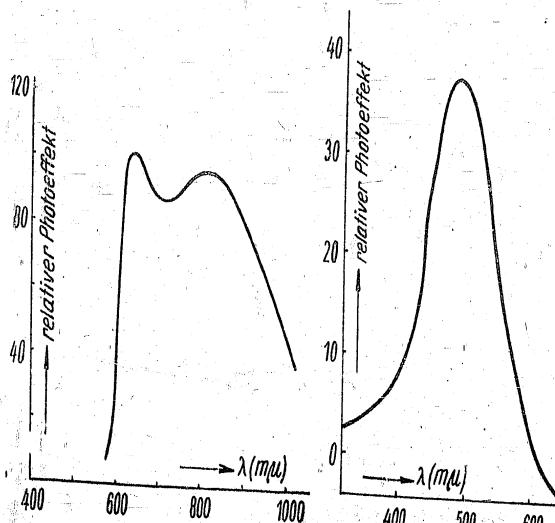


Abb. 43. Spektrale Verteilung einer Kupferoxydul-Hinterwandzelle.

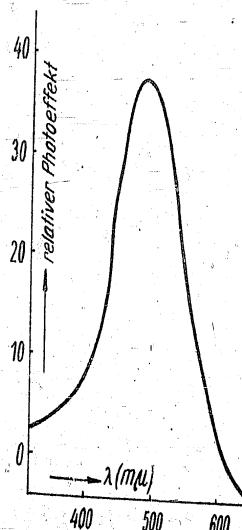


Abb. 44. Spektrale Verteilung einer Kupferoxydul-Vorderwandzelle.

sowohl einer Hinterwand- als auch einer Vorderwandzelle wieder gegeben sind. Die Hinterwandzelle zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei $615 \text{ m}\mu$, welches sich bei abnehmender Temperatur schwach nach kurzen Wellen verlagert. Typisch ist, daß auch hier der maximale Photoeffekt am stärksten an der Absorptionskante des Cu_2O auftritt. Die Temperaturabhängigkeit des Maximums entspricht der von GUDDEN gefundenen Temperaturabhängigkeit des Absorptionsbandes. Ein weiteres Maximum liegt im kurzweligen Ultrarot bei $800 \text{ m}\mu$ und

tritt von Zelle zu Zelle verschieden stark hervor. Die Höhe dieses Maximums hängt von der Temperatur ab. Vorderwandzellen haben ihr Maximum etwas unterhalb $500 \text{ m}\mu$ liegen.

§ 2. Selen

a) Bedeutung und Aufbau der Selensperrsichtzellen

Die größte technische Bedeutung unter den Sperrsichtzellen hat bisher die Selensperrsichtzelle erlangt. Der Grund hierfür mag in erster Linie darin zu suchen sein, daß diese Zellen im sichtbaren Spektralbereich, und zwar im Bereich der Augenempfindlichkeitskurve den größten Photostrom aufweisen. Die Zellen sind vom Typ der Vorderwandzellen. Die Elektronen fließen bei Belichtung vom Selen zur vorderen Elektrode, also wie bei den Cu_2O -Vorderwandzellen, dem Licht entgegen.

Der Aufbau ist ebenfalls verhältnismäßig einfach. Auf einer Metallunterlage befindet sich die Se-Schicht, darüber die Sperrsicht und die dünne durchsichtige Metallhaut als vordere Elektrode. Wie bei allen Sperrsichtzellen wird zur Abnahme des Elektronenstromes ein Metallspritzring auf die vordere Elektrode aufgebracht. Auf diese Weise läßt sich jede Beschädigung der dünnen Metallhaut vermeiden, die bei der Kontaktanwendung auftreten könnte. Die lichtelektrisch ausnutzbare Fläche wird zweckmäßig durch einen Lacküberzug geschützt. In Vakuumgefäßen werden Sperrsichtzellen im allgemeinen nicht eingebaut, weil der Schichtaufbau gegen atmosphärische Einflüsse unempfindlich ist. Darin liegt ein Vorteil, den diese Zellen gegenüber den Zellen nach dem äußeren lichtelektrischen Effekt haben. Durch die Möglichkeit, der metallischen Unterlage nahezu jede beliebige geometrische Form geben zu können, stellt die Sperrsichtzelle, insbesondere die Selensperrsichtzelle, ein bequemes Konstruktionselement dar.

b) Herstellung von Selensperrsichtzellen

Um zu brauchbaren Zellen zu kommen, können verschiedene Wege eingeschlagen werden. Als Unterlage für die Se-Schichten bewähren sich am besten vernickelte Eisenplatten, die im Sandstrahlgebäuse auf-

gerauht sind. Das Se wird auf die so vorbereitete Unterlage im amorph-pulvigen Zustand aufgestreut und, unter Erhitzung über den Schmelzpunkt des Selens, gepreßt. Als günstigste Schichtdicke hat sich eine Dicke von 0,08 mm erwiesen. Die notwendige Sensibilisierung, also das Überführen des Se in die lichtempfindliche Form, besteht in einer Erhitzung bis zu einer Temperatur von $218,5^{\circ}\text{C}$ in Luft oder besser in einem inerten Gas, etwa in Stickstoff, und anschließender langsamer Abkühlung bis auf Zimmertemperatur. Auch die Selensperrschichtzellen fordern eine besondere Achtsamkeit beim Aufbringen der vorderen durchsichtigen Metallschicht. Wie im Falle der Cu_2O -Vorderwandzellen bringt auch für Selensperrschichtzellen das kathodische Aufstäuben, besonders von Edelmetallen, die besten Resultate. Als Füllgas für die Kathodenerstäubung eignen sich Luft, Sauerstoff und Edelgase. Die günstigste Dicke der Metallhaut, z. B. einer Pt-Haut, beträgt $\sim 4 \text{ m}\mu$, wenn Zellen mit einem Durchmesser von $\sim 25-30 \text{ mm}$ zugrunde gelegt werden. Die Dicke der Metallhaut zeigt eine Abhängigkeit vom Zellendurchmesser bzw. von der Zellfläche, weil nicht nur ihre Lichtdurchlässigkeit, sondern auch ihre Leitfähigkeit entscheidend ist¹⁶⁹⁾. Ein anderer Weg, die Se-Schicht zu bilden, ist vor allen Dingen in der russischen Literatur¹⁶⁰⁾ vorgeschlagen worden. Danach soll das Se nicht auf die Unterlage gepreßt, sondern im Vakuum auf die Unterlage aufgedampft werden. Auch wird eine Dicke der Se-Schicht bis zu 0,3 mm als notwendig angesehen.

Zwar können auch durch andere Vorschriften in bezug auf die Temperatur und auf die Behandlungsdauer wie bei der Herstellung von Selenzellen nach dem inneren lichtelektrischen Effekt Gemische verschiedener Gehaltes an kristallinen Modifikationen erzielt werden, jedoch sind die lichtelektrischen Eigenschaften der Selensperrschichtzellen nicht in so starkem Maße davon abhängig.

c) Spektrale Verteilung von Selensperrschichtzellen

Die spektrale Verteilung einer Selensperrschichtzelle zeigt Abb. 45. Man sieht, daß von einem Maximum bei $590 \text{ m}\mu$ nach kurzen Wellen ein langsamer Abfall, jedoch nach langen Wellen ein steiler Abfall erfolgt. Es gibt handelsübliche Zellen, die stärker rotempfindlich sind als die Zellen, deren spektrale Verteilung in Abb. 45 wiedergegeben

ist¹⁶¹⁾. Vermutlich führt die größere Rotempfindlichkeit von der Wahl des Metalls her, welches als vordere Metallschicht aufgestäubt wor-

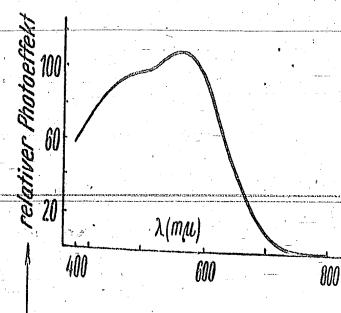


Abb. 45. Spektrale Verteilung einer Selensperrschichtzelle.

den ist, denn es läßt sich zeigen, daß Au-bestäubte Zellen wohl eine geringere Gesamtempfindlichkeit als Pt-bestäubte Zellen, jedoch eine größere Rotempfindlichkeit aufweisen¹⁶²⁾.

d) Wesen der chemischen Sperrschicht

Es scheint zweckmäßig zu sein, unter dem Begriff einer chemischen Sperrschicht (genauer: unter dem Begriff der chemischen Beeinflussung der Randschicht) alle die Veränderungen zu verstehen, die innerhalb der Randschicht (vgl. II, § 5d) oder in ihrer unmittelbaren Nähe hervorgerufen werden können, die also das Angrenzen eines homogen gestörten Halbleiters an das Metall nicht mehr gewährleisten. Inhomogenitäten der Störstellendichte in der Randschicht und in ihrer unmittelbaren Nähe fielen beispielsweise unter den definierten Begriff, ebenso die Einlagerung von Zwischenschichten, deren Komponenten teilweise oder überhaupt nicht mehr mit Komponenten des Grundhalbleiters übereinstimmen müssen. Für die Größe der entstehenden Photo-EMK, in manchen Fällen sogar für das Auftreten der Photo-EMK überhaupt, scheint die chemische Beeinflussung der Randschicht von entscheidender Bedeutung zu sein. Es mag also sein, daß für Sperrschichtzellen in manchen Fällen die chemische Sperrschicht wesentlicher ist als die physikalische Sperrschicht.

Es ist oft die Frage aufgeworfen worden, wohl auch, weil nicht nur wegen der Herstellung der Zellen, sondern auch theoretisch dafür

124 Aufbau und Herstellung von Sperrsichtzellen

Interesse besteht, ob die Sperrsicht Einfluß auf die spektrale Verteilung hat. Obwohl das Wesen der chemischen Sperrsicht an Selensperrsichtzellen noch nicht eindeutig klargelegt ist, läßt sich diese Frage offenbar verneinen. Zellen mit künstlichen Sperrsichten aus isolierenden Stoffen zeigen normalen Selensperrsichtzellen gegenüber keine veränderte spektrale Verteilung¹⁶³⁾. Auch alle variierten Versuche, die auf Grund der von GÖRLICH in Betracht gezogenen Möglichkeiten der Sperrsichtbildung an Selensperrsichtzellen unternommen worden sind, zeigten bisher keinen Einfluß der Sperrsicht auf die spektrale Verteilung. Von den in Erwägung gezogenen Möglichkeiten¹⁶⁴⁾ hat sich noch nicht endgültig entscheiden lassen, ob die Sperrsicht an Selensperrsichtzellen durch oberflächliche Selenoxydschichten, durch eine Schicht einer nicht lichtempfindlichen Selenmodifikation [gestützt durch Überlegungen SCHWEICKERT¹⁶⁵⁾] oder durch eine Selenidschicht, die etwa durch Reaktion des Elektrodenmetalls mit Se entstehen kann [gestützt durch Versuche von FENNER, GUDDEN und SCHWEICKERT¹⁶⁶⁾], gebildet wird. Der Widerstand der Sperrsicht liegt etwa im Bereich von 80 bis 400 $\text{k}\Omega/\text{cm}^2$ (beim Anlegen einer Gleichspannung richtungsabhängig), der Halbleiterwiderstand (Bahnwiderstand) in der Größenordnung 600 Ω/cm^2 . Die Kapazität der Sperrsicht beträgt $\sim 0,04 \mu\text{F}/\text{cm}^2$, woraus eine Dicke der Sperrsicht von $0,2 \mu$ errechnet werden kann.

Bemerkenswert ist ein Versuch SANDSTRÖMS¹⁶⁷⁾, die Verhältnisse an Selensperrsichtzellen im Lichte der MOTTSchen Theorie¹⁴⁾ zu sehen, obwohl durch diese Betrachtung eine Klärung der Frage nach dem Aufbau der Sperrsicht auch nicht möglich ist. Jedoch dürfte die einfachste Annahme die sein, daß die Sperrsicht durch eine Selendioxydschicht gebildet wird. Mit der Belichtung einer Sperrsichtzelle werden deren Sperrsichtwiderstand und deren Kapazität verändert (vgl. X, §1g), was auf eine Abnahme der Dicke der Sperrsicht selbst zurückgeführt werden kann. Man kann annehmen, daß in der Sperrsicht durch die Wirkung des Lichtes positiv geladene Selenionen entstehen, die sich alsdann in Richtung der negativen Seite der Doppelschicht, d.i. zum Selen, hinbewegen. Dort angekommen, rauben sie Elektronen und bilden Kristalle, auf diese Weise die Dicke der Sperrsicht vermindernd. Der Vorgang ist re-

§2. Selon

125

versibel. Die Dickenänderung der Sperrsicht läßt sich zu $\sim 10^{-6} \text{ cm}$ bestimmen.

e) Übertragung von Erfahrungen an Widerstandszenen auf Sperrsichtzellen

Die Ähnlichkeit der spektralen Verteilungen zwischen den Sperrsichtzellen und den Zellen nach dem inneren lichtelektrischen Effekt haben eine große Anzahl von Untersuchungen angeregt, die im wesentlichen darauf beruhen, vom inneren lichtelektrischen Effekt her bekannte Ergebnisse auf die Sperrsichtzelle zu übertragen. Durch Zusatz von Schwefel zum Se soll z.B. das Maximum der spektralen Verteilung nach kürzeren Wellen verlagert werden können, während durch Zusatz von Tellur das Maximum an der gleichen Stelle verbleiben, jedoch ein Anheben des roten Teiles der spektralen Verteilung hervorgerufen werden soll¹⁶⁸⁾. Im Rahmen von Untersuchungen, die sich mit dem Einfluß des aufgestäubten Metalls auf die Größe des Photostromes an Selensperrsichtzellen befassen, konnte gezeigt werden, daß sich durch Cd die Rotempfindlichkeit ebenfalls günstig beeinflussen läßt¹⁶²⁾. Wie auch von anderer Seite bestätigt werden konnte¹⁶⁹⁾, reicht sich dem Se-Maximum bei $590 \text{ m}\mu$ in diesem Falle noch ein Maximum bei $710 \text{ m}\mu$ an (vgl. Abb. 46).

In Fortsetzung dieser Untersuchungen ist noch ein bemerkenswertes Resultat zutage gefördert worden¹⁷⁰⁾. Es ist möglich, die Kadmiumbehandlung der Selenschicht so vorzunehmen, daß eine Sperrsichtzelle mit Vorderwandeffekt entsteht, bei der aber die Richtung des Elektronenflusses von der Frequenz des einfallenden Lichtes abhängt. Bei der Wellenlänge $\sim 610 \text{ m}\mu$ kehrt der Elektronenfluß seine Richtung um, und zwar so, daß für kürzere Wellenlängen die normale Richtung, wie sie in einer Selensperrsichtzelle üblich ist,

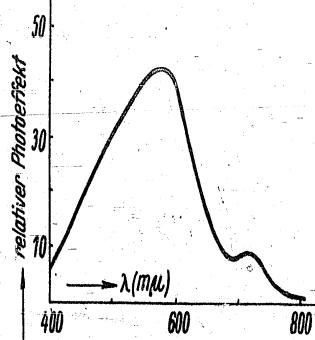


Abb. 46. Spektrale Verteilung einer mit Cd behandelten Selensperrsichtzelle.

c) Richtung des Elektronenflusses und spektrale Verteilung

Die Elektronen fließen im Falle der Belichtung der Thalliumsulfid-Sperrsichtzelle von der vorderen durchsichtigen Metallhaut über den Halbleiter zur Unterlage, d. h. also in Richtung des Lichtes.

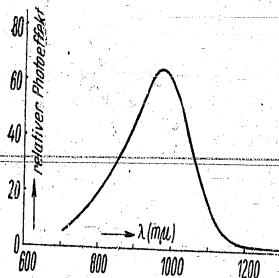


Abb. 47. Spektrale Verteilung einer Thalliumsulfid-Sperrsichtzelle.

Die spektrale Verteilung einer Thalliumsulfid-Sperrsichtzelle (vgl. Abb. 47) ähnelt der einer Thalofidwiderstandszelle sehr stark. Im ultravioletten Teil des Spektrums tritt das bekannte Thalofidmaximum bei $\sim 1 \mu$ ganz ausgeprägt hervor. Die Zelle zeigt eine Empfindlichkeit bis über $1,2 \mu$ hinaus.

§ 4. Silbersulfid

Von LOSCHKAREW, BERNATSKI und GEICHMANN wurden im Physikalischen Institut der Ukrainischen Wissenschaftlichen Akademie im Jahre 1941 Sperrsichtzellen mit Silbersulfidhalbleiterschicht hergestellt. Vermutlich ist dazu wie bei allen Sulfidzellen auch eine Formierung im Sauerstoff notwendig. Die Ag_2S -Sperrsichtzellen zeigen bei einer Farbtemperatur von 2360°K eine außerordentlich hohe Empfindlichkeit von 1000 bis $4000 \mu\text{A/lm}$. In mA/Watt werden demnach Werte bis zu $\sim 4,5$ erreicht. Die langwellige Grenze soll zwischen 1,3 und $1,5 \mu$ liegen, das Maximum der Empfindlichkeit zwischen 900 und 950μ . Der Elektronenfluß unter Einfluß der Belichtung ist der gleiche wie bei den Thalliumsulfidsperrsichtzellen, d. h. die Elektronen fließen von der vorderen Elektrode in den Halbleiter hinein¹⁷⁸.

§ 5. Bleisulfid

§ 5. Bleisulfid

Wie schon erwähnt¹⁷⁶, hat GUILLERY Sperrsichtzellen hergestellt, bei denen er PbS als Ausgangssubstanz verwendete. Das Bleisulfid kann aus Blei und Schwefel bei Temperaturen von 400 bis 500°C hergestellt werden. Das feinkristalline Pulver wird nach längerer Temperaturbehandlung zu Tabletten unter Anwendung hohen Druckes gepreßt. Die Dicke der Tablette soll einige mm betragen. Um eine für die Funktion der Zelle unbedingt nötige Zwischenschicht zu schaffen, wird die Tablette längere Zeit in einer Salzlösung gebadet. Die Dicke der Zwischenschicht, die vermutlich aus Bleikarbonat besteht, soll $\sim 0,1 \mu$ betragen.

Als Deckelektrode wird Silber benutzt. Es soll aber für das Auftreten des Sperrsichteffektes von ausschlaggebender Bedeutung sein, in welcher Weise das Silber mit dem Bleisulfid chemisch zusammenwirken kann. GUILLERY schließt aus seinen Beobachtungen, daß das Silber in der Lage sein muß, Schwefel aus dem Bleisulfid in einer so großen Menge zu beziehen, daß nahe der Zwischenschicht eine Schicht Schwefelsilber entstehen kann. Eine vollständige Umwandlung des Silbers in Schwefelsilber würde den Sperrsichteffekt vernichten. Es bliebe also zu untersuchen, ob die notwendige Zwischenschicht lediglich als Regulator für die richtige Schwefeldosis fungiert oder ob sie die Rolle einer chemischen Sperrsicht übernimmt, indem die Zwischenschicht spezifisch schlechter leitet als das Bleisulfid, oder schließlich, ob die Zwischenschicht beide Funktionen zu übernehmen hat.

Man könnte annehmen, daß es sich unter den geschilderten Umständen um eine Silbersulfidsperrsichtzelle (vgl. VII, § 4) handle und nicht um eine Bleisulfidsperrsichtzelle, zumal der Versuch zeigt, daß als Deckelektrode andere Metalle, wie Cu, Au oder Al, nur dann geeignet sind, wenn zunächst eine dünne Silberschicht auf die Zwischenschicht aufgedampft wird. Aber gegen diese Annahme spricht die spektrale Verteilung, die sich ganz klar als die des Bleisulfids ergibt (vgl. inneren lichtelektrischen Effekt an PbS , VI, § 6, sowie VIII, § 1).

Hinweise auf die Bedeutung der Zwischenschicht kann vielleicht die genauere Untersuchung der Gleichrichterwirkung geben. Die Photo-

elektronen fließen vom PbS zur Deckelektrode, und zwar genau so wie die Flußelektronen bei der Gleichrichtung. Es liegt hier daher ein ganz anderer Fall vor als bei den anderen bekannten Sperrschiichtzellen.

§ 6. Phosphore als Halbleiterschicht

Man kann auch an Stelle der in den vorhergehenden Paragraphen angegebenen Halbleiter Phosphore benutzen¹⁸⁰). Werden Phosphore, etwa CdSCu, CdSNi, ZnSCu oder Mischphosphore ZnSCdSCu, aber auch nicht leuchtfähiger Zinkblendekristall, mit einer lichtdurchlässigen Metallschicht als Deckelektrode bestäubt, so tritt ebenfalls eine selbständige Photo-EMK bei Belichtung auf. Die Größe der Photo-EMK speziell an CdSCu-Phosphoren erreicht Werte, die denen an Selensperrschiichtzellen üblichen entsprechen. Ebenso gleicht die spektrale Verteilung der CdSCu-Phosphore sehr stark der der Selensperrschiichtzellen. Sie ist in geringem Maße veränderlich durch die Präparationsbedingungen des Phosphorgrundmaterials.

VIII. Abschnitt

Zellen aus natürlichen und künstlichen Kristallen

S I. Lichtdetektoren aus natürlichen Kristallen

a) Aufbau der Lichtdetektoren

Von BOSE und auch später von GRÜTZMACHER ist darauf hingewiesen worden, daß ein Bleiglanzdetektor, d.h. also ein gefäßter Bleiglanzkristall mit Spitzkontakt, als Lichtdetektor zu verwenden ist. Er liefert eine trägeheitslose Belichtungsspannung, wenn der Kristall in unmittelbarer Umgebung der Spitze belichtet wird. Voraussetzung für das Auftreten der Belichtungsspannung ist jedoch, daß die Spitze auf einen empfindlichen Punkt des Kristalls aufgesetzt ist. Frische Bruchflächen zeigen eine größere Zahl empfindlicher Punkte als alte Oberflächen¹⁸¹). Wird eine frische Bruchfläche mit starken Säuren oder Laugen geätzzt, so bleibt die Zahl der empfindlichen Punkte gleich. Die Bezirke, die im Falle der Belichtung wirksam sind, haben einen Durchmesser von 0,1 bis etwa 1 mm. Die Größe des lichtelektrischen Effektes hängt wesentlich vom Kontaktdruck ab. Als günstiger Wert hierfür ergibt sich 10^4 kg/cm². Für eine technische Anwendung ist der Spitzkontakt oft unerwünscht. Die geringsten Ershütterungen können ein Abrutschen der Spitze von einer empfindlichen Stelle bewirken, so daß als Folge davon Empfindlichkeitsänderungen auftreten. Durch Aufdampfen oder Aufstäuben von Metallflecken als Ersatz für die Spitzens läßt sich offenbar kein Erfolg erzielen, weil wahrscheinlich ein bestimmter Druck für das Auftreten des Effektes notwendig ist.

b) Auswahl der natürlichen Kristalle

Es hat sich erwiesen, daß nicht jeder natürliche Bleiglanz einen lichtelektrischen Effekt zeigt. Vielmehr existieren Bleiglanzvorkommen, an denen die Lichtwirkungen so klein sind, daß sie nicht mit Sicher-

heit von thermischen Effekten abgetrennt werden können. Auch kann die Richtung des Elektronenflusses verschieden sein, wenn man Kristalle verschiedener Fundorte untersucht. Im allgemeinen fließen die Elektronen vom Kristall zur Spalte, in selteneren Fällen von der Spalte zum Kristall. In der Tab. 15 sind die wichtigsten Fundorte für Bleiglanz, an denen Lichtwirkungen nachgewiesen werden konnten, angegeben und so geordnet, daß die Empfindlichkeit der Kristalle nachfolgender Fundorte jeweils geringer sind als die der vorhergehenden. Für die Gruppe A ist Elektronenfluß vom Kristall zur Spalte, hingegen für die Gruppe B von der Spalte zum Kristall beobachtet worden.

Tab. 15. Vorkommen von Bleiglanz mit Lichtwirkung

Fundort	Struktur
A. Elektronenfluß vom Kristall zur Spalte	
Sardinien - Italien	fein bis grob gekörnt
Sierra Almagrera - Spanien	geschichtet
Arizona - USA	fein gekörnt
Bensberg - Rheinland	Einkristalle
Mies - Böhmen	geschichtet
Holzappel a. d. Lahn	groß gekörnt
B. Elektronenfluß von der Spalte zum Kristall	
Hankau - China	geschichtet und fein bis grob gekörnt
Bad Ems	fein gekörnt
Niederfischbach - Rheinland	Einkristalle

Die schönsten und größten Einkristalle, wie sie vornehmlich aus Beuthen (OS.) stammen, oder die fein- bis grobgekörnten Vielkristalle aus Norwegen oder der Freiberger Gegend haben niemals eine Lichtwirkung erkennen lassen. Häufig vorgenommene spektralanalytische Untersuchungen boten bisher noch keinen Anhaltspunkt dafür, daß bzw. welchen Fremdbeimengungen besondere Bedeutung zukommt.

c) Spektrale Verteilung der PbS-Lichtdetektoren

Im Rahmen der vorliegenden Darstellung wäre die Besprechung des Lichtdetektors nicht notwendig, wenn nicht der Bleiglanzdetektor eine spektrale Verteilung aufwiese, die technisch interessiert. In bezug auf

§ 1. Lichtdetektoren aus natürlichen Kristallen

die Rüttelsicherheit ist die Detektorzelle jeder anderen Zelle unterlegen und somit für eine Anwendung nicht sonderlich zu empfehlen. Die spektrale Verteilung einer PbS-Zelle erstreckt sich, wie aus Abb. 48

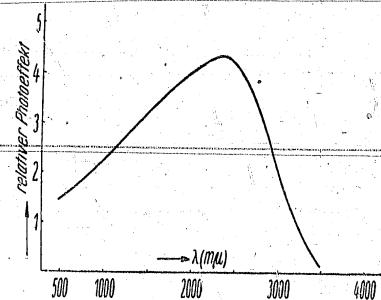


Abb. 48. Spektrale Verteilung einer PbS-Detektorzelle.

ersichtlich ist, bis in die Gegend von 4μ . Ein Maximum liegt bei $2,3 \mu$. Mit der Se-Sperrschichtzelle hat die PbS-Zelle gemeinsam, daß die Empfindlichkeit im Bereich stärkster Absorption verhältnismäßig hoch liegt.

d) Weitere natürlich vorkommende, lichtempfindliche Substanzen

Im Zusammenhange mit dem Lichtdetektor ist es der Erwähnung wert, an einige natürlich vorkommende Substanzen zu erinnern, die im Ultrarot empfindlich sein können. Es handelt sich um Antimonglanz (Sb_2S_3), Molybdänit (MoS_2) und Polybasit $Sb_2S_3 \cdot 9(Ag_2Cu_2)S$. Nachdem das Auftreten einer selbständigen EMK an einem Blatt Molybdänglanzes, welches zwischen zwei Klemmen gebracht wird, nachgewiesen war¹⁸²⁾, ging der Verfasser dazu über, Molybdänitplättchen einseitig und durchsichtig mit Au zu bestäuben. Eine auf diese Weise erhaltene Kristallzelle ist im Wellenlängenbereich um 1μ herum außerordentlich empfindlich, wie durch bisher unveröffentlichte Versuche bewiesen werden konnte. Allerdings spielen offenbar, wie im Falle des Bleiglanzes, geringfügige Beimengungen eine große Rolle, denn die Größe des Effektes ist vom Fundort abhängig. Die Ultrarotempfindlichkeit des Polybasites konnte durch die Methode von BÄRGMANN-HÄUSLER¹⁸³⁾ nachgewiesen werden, die die Substanz in pulverisierter Form mit Zaponlack in dünner Schicht auf ein Deck-

gläischen auftragen und zwischen zwei Kondensatorplatten bringen, von denen eine aus einer durchsichtig vergoldeten Glasplatte besteht. Der Kondensator wird ohne Vorspannung an den Verstärkereingang gelegt und intermittierend belichtet.

Man kann die BERGMANN-HÄUSLERSche Anordnung bequem dazu benutzen, festzustellen, welche Art der Leitfähigkeit eine Substanz im belichteten (bzw. auch unbelichteten) Zustand besitzt¹⁸⁴⁾. In Tab. 15 b sind auf die Weise bereits untersuchte Halbleiter zusammengestellt.

Tab. 15 b. Art der Leitfähigkeit einiger Halbleiter im belichteten Zustand

Halbleiter	Leitung	Halbleiter	Leitung
Cu ₂ O	Defekt	InSe	Defekt
Se	Defekt	CdS	Überschuß
Bi ₂ S ₃	Überschuß	PbO	Überschuß
Bi ₂ Se ₃	Defekt	PbJ	Defekt
SnS	Defekt	HgS	Überschuß
SnSe	Defekt	HgJ	Überschuß
MoS ₂	Defekt	HgJ ₂	Überschuß
Tl ₂ S	Überschuß	Ag ₂ S	Überschuß
Tl ₂ Se	Defekt	ZrS ₂	Überschuß
Sb ₂ Se ₃	Defekt	ZrSe ₂	Überschuß
Sb ₂ Se ₃ + 2% Sb	Überschuß	USe ₂	Defekt
Sb ₂ Se ₃ + 2% Se	Defekt		

Untersucht man mit Hilfe der bequemen BERGMANN-HÄUSLERSchen Kondensatormethode Substanzen, deren spektrale Verteilungen als Photowiderstände und als Sperrschichtzellen bekannt sind, etwa Thallofid oder Selen, so findet man eine sehr weitgehende Übereinstimmung aller drei spektraler Verteilungen¹⁸⁵⁾. Man kann daher vermuten, daß es auch gelingen wird, Photowiderstände bzw. Sperrschichtzellen aus photographischen Sensibilisatoren herzustellen, die, wie PUZEJKO ebenfalls feststellte, in vielen Fällen ihre lichtelektrische langwellige Grenze in der Gegend von 1,1 μ haben.

Es ist interessant, zu sehen, wie sich zwei Gebiete gegenseitig befruchten können, in diesem Falle der lichtelektrische Effekt einerseits und der photographische Effekt andererseits. Schon in IV, §1 war diese Tatsache feststellbar. In konsequenter Fortführung dieser

Gedanken würde von lichtelektrischer Seite vorzuschlagen sein, photographische Emulsionen mit PbS bzw. PbSe oder PbTe, entsprechend der starken Ultrarotempfindlichkeit dieser Substanzen (vgl. VI, § 6), zu sensibilisieren, bzw. die STASIW-TELTONWSchen Versuche (vgl. IV, § 1f) in entsprechender Weise auszudehnen.

§ 2. Bleiglanznetzzellen aus natürlichen Kristallen

a) Aufbau und Herstellung der Bleiglanznetzzellen

Die BOSE-GRÜTZMACHERSchen Untersuchungen am Bleiglanzdetektor veranlaßten MICHELSEN, eine neue Form der Zellen zu suchen, die den wesentlichsten Nachteil der Bleiglanzdetektoren, nämlich die große Erschütterungsempfindlichkeit, nicht aufweist. In der Bleiglanznetzzelle kann die verbesserte Zellenform gesehen werden.

Ein natürlicher Bleiglanzkristall wird auf einer Seite, und zwar der später dem Licht zugekehrten, geschliffen und hochglanzpoliert. Durch das Einbetten der Rückseite des Kristalls in eine mit Wood-Metall ausgefüllten Halterung und durch Aufpressen eines engmaschigen Metallnetzes auf der polierten Kristallfläche sind die beiden notwendigen Elektrodenzuführungen geschaffen. Die Zelle muß sodann, um vor allem unkontrollierbare Einflüsse der Atmosphäre an der Kristalloberfläche auszuschalten, in ein Vakuumgefäß, dessen Lichteintrittsfenster aus Quarz besteht, eingebracht und bei verhältnismäßig niedriger Temperatur, etwa 150° C, formiert werden. Nach Untersuchungen von GÖRLICH¹⁸⁶⁾ können Empfindlichkeitssteigerungen erzielt werden, wenn je nach dem verwendeten Kristallmaterial im Anschluß an den Formierprozeß Blei oder Schwefel im Überschuß aufgedampft werden und ein zweiter Formierprozeß ebenfalls bei niedriger Temperatur angeschlossen wird.

Es ist ersichtlich, daß die Größe des Effektes vom Druck, mit dem das Metallnetz aufgepreßt wird, abhängt, wie auch beim Bleiglanzdetektor die Größe des Effektes vom Druck der aufgesetzten Metallspitze abhängig ist. Am günstigsten wäre eine Konstruktion, bei der der richtige Druck des Netzes nach dem Formierprozeß eingestellt werden könnte, weil sich durch die Beanspruchung des Netzes bei der Wärmebehandlung Änderungen des Druckes ergeben. Um jedoch eine

komplizierte Konstruktion zu vermeiden, muß man damit vorliebnehmen, den günstigsten Druck vor dem Einbau der Zelle in das Vakuumgefäß einzustellen.

b) Betrachtung zur Auswahl der Kristalle

Der lichtelektrische Effekt der Bleiglanznetzzele beruht ersichtlich auf den gleichen Erscheinungen wie der lichtelektrische Effekt an den Bleiglanzdetektoren, was schon daraus hervorgeht, daß für Bleiglanznetzzeilen geeignete Kristalle mit Hilfe des Spaltenkontaktees ausgesucht werden können. Die in der Tabelle 15 angegebene Reihenfolge bleibt auch für Bleiglanznetzzeilen gültig, wobei zu bemerken ist, daß spektralanalytische Untersuchungen ebenfalls keine Anhaltspunkte über die Wirkung von Fremdbeimengungen auf den lichtelektrischen Effekt ergeben haben. Es scheint jedoch, daß die Mitwirkung von Sauerstoff wie bei den PbS-Widerstandszellen von Bedeutung ist.

Zur Ausbildung einer selbständigen Belichtungsspannung dürfte die Kristallstruktur von Einfluß sein. Es ist auffallend, daß Schliffuntersuchungen eine Reglosigkeit in den entstandenen Splitterflächen an lichtelektrisch wirksamen Kristallen (Sardinischer Bleiglanz, Bleiglanz der Castle Dome Mine Arizona und aus Mies-Böhmen CSR) zeigen, während lichtelektrisch unwirksame Kristalle (chinesischer Bleiglanz und Bleiglanz aus Freiberg/Sa.) hingegen, mit der Lupe und sogar schon mit bloßem Auge erkennbar, offenbar aus mehreren zusammen gewachsenen einkristallähnlichen Stücken bestehen. Die Zahl und die Art der Grenzflächen in der belichteten Zone des Kristalls rufen offenbar die zur Bildung einer selbständigen Belichtungsspannung notwendigen Grenzflächeneffekte hervor.

c) Spektrale Verteilung der Bleiglanznetzzeilen

Die spektrale Verteilung der Bleiglanznetzzeilen ist identisch mit der der Bleiglanzdetektoren (vgl. Abb. 48). Auffällig ist, daß die spektralen Verteilungen der Zellen mit natürlichen Kristallen immer eine größere Rotempfindlichkeit zeigen als die der PbS-Widerstandszellen im ungekühlten Zustand, wobei jedoch ungeklärt ist, ob dafür die Grenzflächeneffekte oder aber unbekannte Beimengungen in den natürlichen Kristallen verantwortlich zu machen sind.

§ 3. Zellen aus künstlichen Kristallen

a) Siliziumkarbid und Germanium

Die günstigen Ergebnisse, die an Gleichrichtern aus Karborund und Germanium erzielt wurden, haben zur Untersuchung der inneren lichtelektrischen Wirkung von Karborund¹⁸⁷⁾ und Germanium¹⁸⁸⁾ ($\lambda_{max} = 1,3 \mu$, $\lambda_0 = 1,5 \mu$) angeregt. Besonders aufschlußreich sind die Untersuchungen am künstlichen Siliziumkarbid, die fast ausnahmslos mit gefederter Spitze, wie dies bei den Detektoren üblich ist und auch für den Bleiglanzlichtdetektor von BOSE und GRÜTZMACHER gemacht wurde, durchgeführt worden sind. Sowohl am schwarzen, als auch am grünen Karborund wird eine Gleichrichterwirkung gemessen, die offenbar ihren Sitz in der Kontaktobерfläche hat. Für den Karborund dürfte die WILSONSche Theorie, die eine Sperrschieth von $\sim 10^7$ cm Dicke fordert, Gültigkeit haben. Es ist wahrscheinlich, daß die bei $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ gebildete Sperrschieth aus SiO_2 besteht¹⁸⁹⁾. Karborund ist ein Verunreinigungshalbleiter. Im grünen Karborund wird der Elektronenfluß vom Halbleiter zum Metall, im schwarzen dagegen in entgegengesetzter Richtung bevorzugt¹⁹⁰⁾. Spätere Untersuchungen über den Leitungsmechanismus ergaben Überschußhalbleitung für grüne SiC-Kristalle und Defekthalbleitung für schwarze¹⁹¹⁾. Erfolge dieser Untersuchungen sind zu verzeichnen und beispielsweise darin zu sehen, daß bereits sogenannte „Silicon“-Widerstandszellen, das sind aus aufgedampften Si-Filmen (Unterlage Keramik oder Quarz) bestehende Schichten ($\lambda_{max} = 850 \text{ m}\mu$), technisch angewendet werden¹⁹²⁾. Ebenso dürfte sich eine Germaniumwiderstandszelle mit Spaltenkontakt, hervorgegangen aus dem „Transistor“, ein gewisses Anwendungsgebiet sichern¹⁹³⁾. Nach Messungen von BRIGGS besitzt diese Art der Zelle ein Maximum bei $\sim 1,5 \mu$, allerdings mit einem starken Abfall nach der ultravioletten Seite hin. Bei allen Zellen aus Karborund und Germanium mit Spaltenkontakt dürfte sich bei entsprechender Behandlung eine mehr oder weniger starke Ausbildung einer Photo-EMK bei Belichtung nachweisen lassen.

b) Bleisulfid und Bleiselenid

Nach bisher noch nicht veröffentlichten Ergebnissen von GÖRLICH gelingt es leicht, durch Vakuumsublimation künstliche Vielkristalle

aus PbS und PbSe herzustellen. Nach einer Temperung im Sauerstoff bei 500 bis 580° C zeigen diese künstlichen Kristalle eine selbständige Photo-EMK bei Belichtung der Kontaktstelle Spitze-Kristall. Der Elektronenfluß kann beide Richtungen bevorzugen, je nachdem, ob die Kristalle Defekt- oder Überschußhalbleitung besitzen. Es lassen sich, ebenso wie mit natürlichen Kristallen, Netzzellen herstellen. Die sich aus diesen Untersuchungen ergebenden Folgerungen für die Herstellung von Widerstands- und Sperrsichtzellen lassen sich noch nicht voll übersehen.

LEGRAND¹⁰⁴⁾ berichtet zwar auch über die Herstellung künstlicher PbS-Kristalle, findet aber nur einen sehr kleinen lichtelektrischen Effekt. Ihm fehlte die Erkenntnis, daß auch bei künstlichen Proben an der Oberfläche jedes Kristallchens wenigstens in Sperrsichtdicke ($\sim 10^{-7}$ cm) das lichtempfindliche Reaktionsprodukt (vgl. VI, § 6a) hervorgerufen werden muß.

IX. Abschnitt

Technische Ausführungsformen

§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

(Alkalizellen)

a) Probleme der Serienfertigung

Wie jede jüngere technische Anwendung einer physikalischen Erkenntnis, sind auch die technischen Photozellen, weil sie in ihrem Anfangsstadium einer Normung nicht unterzogen werden konnten, in einer Vielzahl von Typen aufgetreten. Wenn auch einige ordnende Gesichtspunkte, wie spektrale Verteilung oder Elektrodenanordnung, vorhanden sind, so läßt doch, was besonders in bezug auf die Fertigungsschwierigkeiten von Bedeutung ist, die Wahl des Zellengehäuses, dessen Größe und die Art der Sockelung allein genügend Spezialraum für jeden Hersteller, so daß ohne Normungsgesichtspunkte eine große Zahl von Typen erstehen muß. Da außerdem die Anwendungsgebiete der Zellen stark heterogen sind und jeder Zellenbenutzer für seine Konstruktion unter Ausnutzung der Sachlage am liebsten eine Spezialzelle zur Verwendung bräuchte, wird sich eine Normung in der nahen Zukunft auch nur durch Schließen von Kompromissen durchführen lassen. Wer einmal erlebt hat, wieviel unerwartete Schwierigkeiten bei der Einführung einer neuen Zellenform in die Serienfertigung auftauchen und wie verteuert sie auf das fertige Produkt wirken können, wird allerdings, wenn nur irgend möglich, schon von selbst auf eine bereits serienmäßig vorhandene Type zurückgreifen. Durch den starken Verbrauch an Zellen für den Tonfilm haben sich lediglich die „Tonfilmzellen“ herausgebildet, und selbst diese noch, den verschiedenen Theaternaschinen entsprechend, in verschiedener geometrischer Ausführung. Immerhin besteht der Zustand, daß für eine Maschine Photozellen verschiedener Hersteller auswechselbar verwandt werden können.

Die Photozellenauswahl, die jede Herstellerfirma bieten kann, wird mehr oder weniger zufällig davon abhängig sein, welche lichtelektrischen Probleme im Laufe der Zeit dem Hersteller angetragen wurden. Hat dabei keines der angetragenen Probleme zu einer ausgeweiteten Serienfertigung von Zellen geführt, so daß sich dem Hersteller keine Gelegenheit zum Sammeln von Betriebserfahrungen bot, wird wohl in den meisten Fällen dieser Herstellungszweig als unrentabel aufgegeben bzw. auf bestimmte Typen beschränkt worden sein. Daher können auch die in Tab. 16, in der wohl die bekanntesten Hersteller-
namen zusammengetragen sind, keinen Anspruch auf absolute Richtigkeit und Vollständigkeit erheben. Tab. 16 entspricht etwa dem Stande des Jahres 1945.

b) Tonfilm- und Meßzellen

Die bereits erwähnte Tonfilmzelle zeichnet sich im wesentlichen durch geringe Kapazität aus, während auf beste Isolation, wie sie etwa von Zellen für photometrische Anwendungen verlangt wird, nicht geachtet zu werden braucht. Um das Glühlampenlicht möglichst auszunutzen, sind die Tonfilmzellen mit Cäsiumoxydschichten ausgerüstet. Neuerdings drängt sich die Legierungsschicht wegen ihrer auch im Glühlampenlicht hohen Empfindlichkeit und wegen ihrer leichteren serienmäßigen Herstellung ebenfalls als Schicht für Tonfilmzellen auf (IV, § 4n). Zellen, die hingegen für photometrische Zwecke, bzw. allgemein für Meßzwecke, benutzt werden sollen, bei denen also der Zeitkonstanten oft keine besondere Bedeutung beigemessen zu werden braucht, besitzen zweckmäßig keine zu hohe Empfindlichkeit und, um eine hohe Isolation zu gewährleisten, zwischen den Elektroden lange Kriechstrecken und oft sogar noch Erdungsschellen. Daß die Herstellung der Meßzellen größere Erfahrungen voraussetzt und wesentlich schwieriger und daher auch teurer ist als die Herstellung von Tonfilmzellen, liegt auf der Hand. Man wird daher, um ein konkretes Beispiel zu wählen, für eine gewöhnliche Relaischaltung an Stelle einer teureren Meßzelle eine serienmäßige Tonfilmzelle wählen.

Meßzellen zur Messung geringster Intensitäten, welche z.B. in der astronomischen Photometrie gebraucht werden, müssen die schärfsten Bedingungen erfüllen¹⁸⁵⁾. Neben der bereits erwähnten Forderung

§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

nach hoher Isolation zwischen Kathode und Anode und der Forderung nach niedrigstem Dunkelstrom (vgl. X, § 5b) steht die Forderung nach einem Minimum an Zellenkapazität. Die geringste Eingangskapazität (Photozelle und Ankopplung) am Verstärker dürfte bei $\sim 10^{-12}$ F liegen.

c) Gasgefüllte Zellen

Um den Photostrom zu verstärken, kann die Zelle mit einem Gas, welches mit der lichtempfindlichen Schicht nicht reaktionsfähig ist, gefüllt werden. In erster Linie kommt als Füllgas für die mit zusammengesetzten Schichten ausgerüsteten modernen Photozellen eines der Edelgase in Betracht. Die lichtelektrisch ausgelösten Elektronen nehmen beim Durchfliegen der freien Weglänge so viel Energie aus dem Feld auf, daß sie das Füllgas zu ionisieren vermögen. Die Verstärkung des Photostromes erfolgt also durch Stoßionisation. In der sogenannten gasgefüllten Photozelle oder kurz Gaszelle wird von dieser Art der Verstärkung Gebrauch gemacht. Da jedoch der Vorteil der Verstärkung des Photostromes in der gasgefüllten Zelle auf der anderen Seite durch Verzicht auf einige wertvolle Eigenschaften, wie Proportionalität oder Frequenzunabhängigkeit, erkauft werden muß, nimmt weiterhin neben der gasgefüllten Photozelle die Vakuumphotozelle, und zwar insbesondere für Meßzwecke, einen breiten Raum in der Photozellenherstellung ein.

d) Einfluß der Elektrodenanordnung

Ein wichtiger Gesichtspunkt, nach dem sich sowohl die technischen Photozellen als auch die verschiedensten Spezial- und Laboratoriumszellen einordnen lassen, ist in der Elektrodenanordnung zu sehen. Im wesentlichen lassen sich die Zellen in vier Gruppen einteilen: α) in die Gruppe mit zentraler Kathode, β) in die Gruppe mit zentraler Anode, γ) in die Gruppe mit planparallelen bzw. parallelen Elektroden und schließlich δ) in die Gruppe mit symmetrischen oder spiegelbildlichen Elektroden.

Zellen mit zentraler Kathode (Gruppe α) werden nur in den seltenen Fällen gebraucht, in denen Wert darauf gelegt wird, daß Vakuumzellen bei niedrigen Spannungen gesättigt sind, d.h. daß alle aus der lichtempfindlichen Schicht austretenden Photoelektronen von der

Anode aufgefangen werden. Serienmäßig werden Zellen mit zentraler Kathode augenblicklich nicht gefertigt.

Eine Form für Tonfilmzwecke machte vor längerer Zeit von sich reden. Die lichtempfindliche Schicht befand sich dabei auf einem Draht, der axial in einem Zylinder gespannt war. Die Innenwand des Zylinders war metallisiert und diente als Anode. Auf der Drahtkathode wurde der Tonstreifen abgebildet, so daß der übliche Spalt in Wegfall kommen konnte. Heute wird die Zelle nicht mehr verwendet.

Besondere Bedeutung kommt jedoch der zentralen Kathode für Laboratoriumszellen zu. Um die Elektronenenergieverteilungskurve aufzunehmen, ist die Kenntnis des Anlaufgebietes der Strom-Spannungscharakteristik einer Kugelzelle mit zentraler, kleiner Kathode, die also allseitig von der Anode umschlossen ist, nötig. Im allgemeinen wird die Anode durch eine halbdurchlässige Metallschicht auf der Kugelinnwand gebildet, wenn man nicht vorzieht, die ganze Kugel bis auf ein Lichteintrittsfenster undurchlässig zu metallisieren.

Am häufigsten verbreitet findet man Photozellen mit zentraler Anode (Gruppe β), wobei die Zellenkörper sowohl kugel- als auch zylinderförmig vorkommen. Die europäischen Fabrikate bevorzugen die Kathodenschicht auf der Glaswand, indem nur ein Teil des Zellenhäuses für den Lichteintritt freigehalten wird und dadurch die Zelle nahezu als schwarzer Körper angesehen werden kann, der praktisch alles einfallende Licht absorbiert. Bei den meisten amerikanischen Fabrikaten hingegen ist die lichtempfindliche Schicht auf einer die Anode halbkreisförmig umgebenden Metallplatte aufgebracht (Vorteil: Hochfrequenzentgasung). Neben der stabförmigen Anode in zylindertörmigen Zellen oder der kugeligen Anode in Kugelzellen werden in beiden Zellenformen oft auch haernadelförmige bzw. ringförmige Anoden angewandt. In vielen Fällen wird die Anode durch ein Netz, etwa ein Ni- oder Cu-Netz, gebildet, um Wandladungen unwirksam zu machen. Wandladungen können an Zellen auftreten, bei denen nicht alle Photoelektronen die Anode erreichen, also an ihr vorbeifliegen und die Zellenteile aufladen, die nichtleitend sind, wie etwa das Lichteintrittsfenster der Zelle. Der Durchgriff solcher Wandladungen durch eine netzförmige Anode ist geringer als durch eine einfache Drahtanode.

§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

143

Netzanoden bewähren sich am besten, wenn man zu parallelen bzw. planparallelen Elektrodenanordnungen (Gruppe γ) übergeht. Unter paralleler Anordnung soll eine solche verstanden werden, bei der ein Schnitt durch beide Elektroden in Richtung der senkrecht aus der Kathode austretenden Elektronen Parallele ergibt. Ein Spezialfall paralleler Anordnung ist die bereits genannte Anordnung, bei der sich Anode und Kathode planparallel gegenüberstehen. In diesem Fall ist das Feld zwischen den Elektroden bis auf die Randstörungen homogen. Die Randstörungen lassen sich herabsetzen, wenn die Kathode kleiner ausgeführt ist als die Anode. Die Feldverteilung hat dann einen besonders großen Einfluß, wenn die Zellen gasgefüllt sind. Zentrale Kathode oder zentrale Anode ergeben planparallele Anordnungen gegenüber Feldverteilungen, die bewirken, daß die Ionisation in der Nähe der Kathode bzw. der Anode früher einsetzt. Dieser frühzeitige Einsatz der Ionisation in der Nähe der Kathode kann sich besonders bei der Verwendung zusammengesetzter Schichten ungünstig auswirken, weil diese Schichten einem zu starken Ionenbombardement nicht gewachsen sind.

Die in die Gruppe mit spiegelbildlichen Elektroden fallenden Zellen (Gruppe δ) müssen Elektroden besitzen, die völlig gleichwertig in bezug auf ihre Lage zum einfallenden Licht und auf ihre lichtelektrische Empfindlichkeit sind. Während alle anderen Zellen eine Gleichrichterwirkung zeigen, können Zellen mit spiegelbildlichen Elektroden als Wechselstromwiderstand angesehen werden, der mit der Belichtung eine Veränderung erfährt. Bekannt geworden ist eine solche Zelle nach HULL¹⁰⁶.

e) Technische Typen

Die Tabelle 16 stellt einen Versuch dar, die Vielzahl der Typen der bekanntesten Hersteller übersichtlich anzugeben. Die ausländischen Firmen werden von den deutschen getrennt aufgeführt.

f) Einfluß der Farbtemperatur auf den Empfindlichkeitswert

Wie aus Tab. 16A ersichtlich ist, bezieht noch jeder Hersteller die Zellenempfindlichkeit in $\mu\text{A/lm}$ (vgl. II, § 3a) auf eine ihm zweckmäßig erscheinende Farbtemperatur. Daher lassen sich die Empfindlichkeiten

von Zellen verschiedener Hersteller nicht unmittelbar miteinander vergleichen. Der Grund für die verschiedene Wahl der Farbtemperatur mag in der Hauptsache darin liegen, daß in den verschiedenen Anwendungsbereichen Lichtquellen unterschiedlicher Farbtemperaturen Verwendung finden und der Hersteller im allgemeinen geneigt ist, sich den ihm bekannten praktischen Anforderungen anzupassen. Um den Einfluß der Farbtemperatur auf den Empfindlichkeitswert zu zeigen, ist in Abb. 50 für eine Cäsiumoxyd- sowie für eine Legierungszelle die Abhängigkeit der Empfindlichkeit in $\mu\text{A}/\text{Im}$ von der Farbtemperatur wiedergegeben (nach Messungen von GÖRLICH und LANG, vgl. aber auch¹⁹⁷).

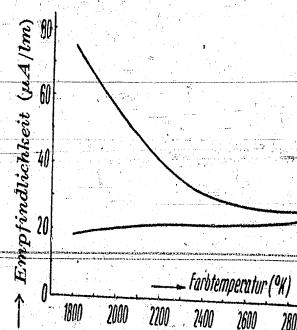


Abb. 50. Empfindlichkeitswerte für Photozellen mit Cs₂O—(a) bzw. Legierungsschicht (b) in Abhängigkeit von der Farbtemperatur der benutzten Lichtquelle.

sowohl wie für eine Legierungszelle die Abhängigkeit der Empfindlichkeit in $\mu\text{A}/\text{Im}$ von der Farbtemperatur wiedergegeben (nach Messungen von GÖRLICH und LANG, vgl. aber auch¹⁹⁷).

g) Spezialzellen

Neben den bisher behandelten seriennäßigen Zellentypen sind hauptsächlich in Patentschriften eine Anzahl von Vorschlägen über Zellen bekannt geworden, die neben der Aufgabe, Lichtschwankungen in Strom- bzw. Spannungsschwankungen umzusetzen, noch zusätzliche Aufgaben erfüllen sollen. In den meisten Fällen zeigten schon Ausführungsmuster die erheblichen Nachteile, so daß seriennäßige Zellen mit kombinierten Funktionen augenblicklich nicht erhältlich sind. Beispielsweise hat man versucht, um die schädliche Kapazität der Zuleitung von der Photozelle zur ersten Verstärkeröhre zu vermeiden, die Photozelle im gleichen Vakuumgefäß mit der Verstärkeröhre unterzubringen. Es kann in diesem Falle entweder die Anode oder die Kathode des Photozellenteiles auf kürzestem Wege zum Gitter des Verstärkerteiles geführt werden. Die Nachteile sind jedoch erheblich. Die starke Gasabgabe der Glühkathode im Dauerbetrieb bewirkt eine Instabilität der Photoemission, die Belichtung der Photokathode durch die Glühkathode muß verhindert werden, und schließlich

§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

ist eine Gasfüllung im Hinblick auf den Verstärkerteil der Röhre nicht möglich. Auch Verstärkeröhren, deren Gitter lichtempfindlich sind (gebildet z. B. durch auf die Glaswand der Röhre niedergeschlagene lichtelektrische Schichten), haben sich auf die Dauer nicht bewährt.

Schließlich sei noch erwähnt, daß versucht worden ist, eine Verstärkeröhre zu bauen, bei der die Glühkathode durch eine lichtelektrische Kathode ersetzt ist. Abgesehen davon, daß die Zelle wegen der geringen Photoströme nur in den Anfangsstufen verwendbar ist und durch die notwendige Heizung der Lichtquelle an Heizenergie nichts eingespart werden kann, erfordert die Konstanthaltung der Lichtquelle erheblichen Aufwand. Außerdem darf, um ein Brummen zu vermeiden, die Lichtquelle nur mit Gleichstrom betrieben werden. Für die technische Anwendung bedeutet letztere Tatsache einen nicht zu unterschätzenden Nachteil. Bedenkt man noch, daß die seriennäßige Herstellung solcher Spezialzellentypen auf große Schwierigkeiten stößt, so wird man gern auf ihre Anwendung verzichten.

Eine Zelle, die für spezielle Anwendungen technische Bedeutung erlangen könnte, ist in einer gasgefüllten Zelle mit thermischer Kathode zu sehen¹⁹⁸. Die mit Argon unter einem Druck von $5 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-1}$ mm Hg gefüllte Zelle wirkt zunächst wie jede Gaszelle, d.h. der Photostrom wird durch Stoßionisation verstärkt. Gleichzeitig jedoch wird durch die positiven Ionen die Raumladung in der Nähe der Glühkathode zerstört, so daß die durch die Photoelektronen erzeugten positiven Ionen den thermischen Elektronenstrom, der von der Glühkathode zur gemeinsamen Anode fließt, steuern. Die Gesamtstromverstärkung einer derartigen Zelle beträgt 10^5 . Zu beachten ist, daß eine Glühkathode verwendet werden muß, die schon bei niedriger Temperatur (etwa schwacher Rotglut) genügend emittiert, um eine Belichtung der Photokathode zu vermeiden. Von vornherein ist natürlich zu bedenken, daß eine solche Zelle nicht frequenzunabhängig arbeiten kann. Ihr Anwendungsgebiet beschränkt sich daher auf Probleme, bei denen höhere als Hörfrequenzen nicht auftreten (etwa Relaischaltungen).

Tab. 16. Überblick über technische Photozellen

A. Inländische

Firma	Zellenbezeichnung	Vakuumzelle V gasgefüllte Zelle G	Max. Betriebsspannung in Volt	Empfindlichkeit in $\mu\text{A}/\text{lm}$	Spektrale Verteilung
AEG	353013 bzw. Pz 2703 CV	V	300	20-40*)	Cäsiumoxyd
	353012 bzw. Pz 2703 CG	G	80-100	50-100	
	353008 bzw. Pz 8 CV				
	353027	V	300	20-40	Cäsiumoxyd
	353028 bzw. Pz 8 CG	G	80-100	50-100	
	35317	V	300	3-10	Kaliumoxyd
	353018	G	80-100	15-30	
	353089	V	300	20-40	Cäsiumoxyd
	353090	G	80-100	50-100	
	353010	V	300	20-40	Cäsiumoxyd
	353016	V	300	5-10	Kaliumoxyd
	353014	V	300	15-30	Cäsiumoxyd
	353098	V	300	3-10	Kaliumoxyd
	353099	G	80-100	15-30	
	353100	V	300	15-40	
	353101	G	80-100	50-100	Cäsiumoxyd
	353112				Cäsiumoxyd
	353120	V	300		Kaliumoxyd
	353116	V	300		
	353123	G	80-100		Cäsiumoxyd
	353124	V	300		Kaliumoxyd
Besonderheiten:					
Kugelzelle					
Zylinderzelle					
Miniatufrizontzelle					
Ringzelle					
*) Bei 100 V und $T = 2400^\circ\text{K}$.					
Außendurchmesser 10 mm Höhe 350 mm					
Lichtempfindliche Fläche 0,9 cm^2 , geeignet für Bildübertragung					
Lichtempfindliche Fläche 28 cm^2 , geeignet für Bildabtastung					

§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

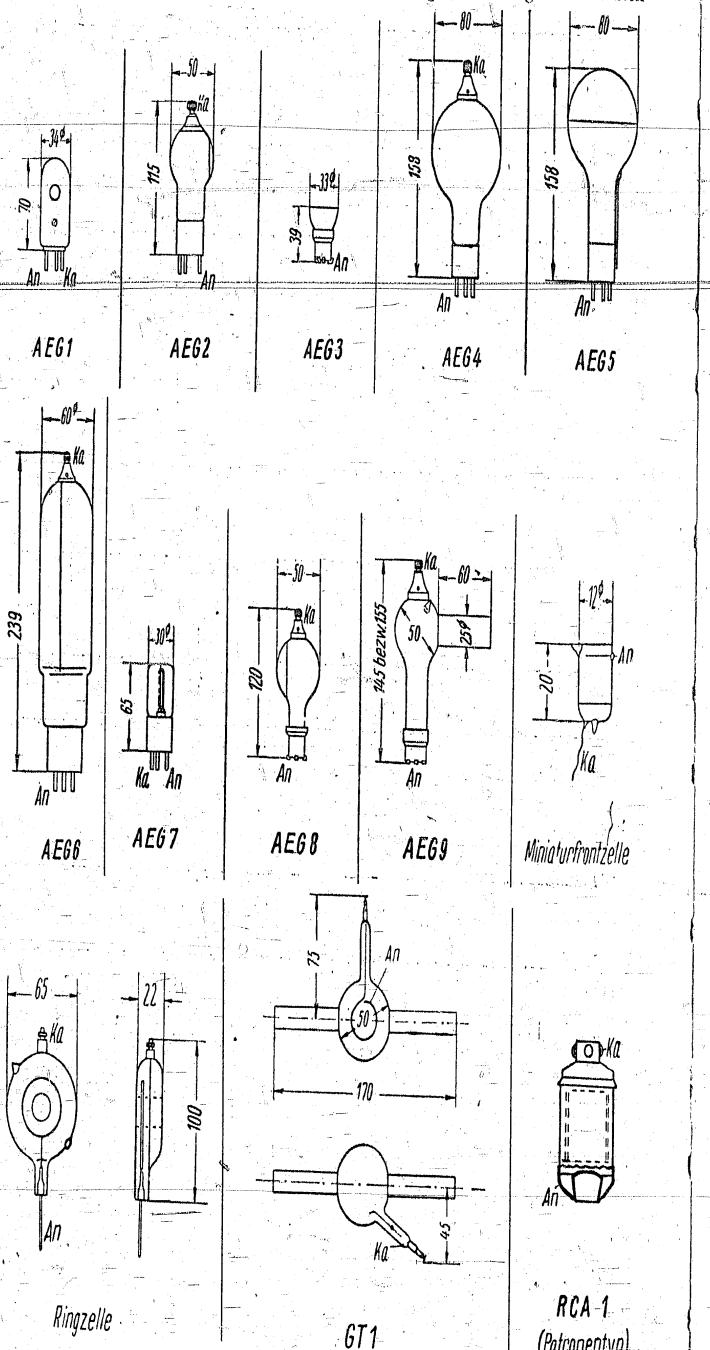
mit äußerem lichtelektrischen Effekt

Hersteller

Maße in mm ohne Steckerstifte a) Höhe b) Durchmesser	Lichtempfindliche Fläche in cm^2	Art der Sockelung	Sonstige Kennzeichen	Schema der Zelle (vgl. Abb. 49)
a) 70 b) 34	1,2	Europasockel (Stiftsockel)	Zelle hat Kugelform und ist von Isolierschutzhülle umgeben	AEG 1
a) 115 b) 50 (größter \varnothing)	10	Europasockel (Stiftsockel)	Gute Konstanz und Unempfindlichkeit gegen den Einfluß kurzwelliger Sonnenstrahlung Isolation $10^{12} \Omega$	AEG 2
a) 39 b) 30 (größter \varnothing)	11	Europasockel (Außenkontakte-sockel)	Frontzelle	AEG 3
a) 158 b) 80	20	Europasockel (Stiftsockel)	Zelle alleseitig empfindlich, Kugeloberfläche 200 cm^2	AEG 4
a) 239 b) 60	90	Europasockel (Stiftsockel)	Frontzelle	AEG 5
a) 239 b) 60	130	Europasockel (Stiftsockel)	Großflächige Zelle	AEG 6
a) 65 b) 30 (größter \varnothing)	8	Europasockel (Stiftsockel)	Zelle für Relaischaltungen	AEG 7
a) 120 b) 50	5	Europasockel (A.-K.-Sockel)	Ultraviolettdurchlässiges Glasfenster, Isol. $10^3 \Omega$	AEG 8
a) 145 bzw. 155 b) 50 (Länge Tubus 60) (\varnothing Tubus 25)	5	Europasockel (Außenkontakte-sockel)	Quarzfenster, Isolation $10^{13} \Omega$	AEG 9
heiten				
Miniatufrizontzelle Ringzelle				

Technische Ausführungsformen

Abb. 49. Ausführungsformen der gebräuchlichsten



§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

handelsüblichen Photozellen (vgl. Tab. 16)

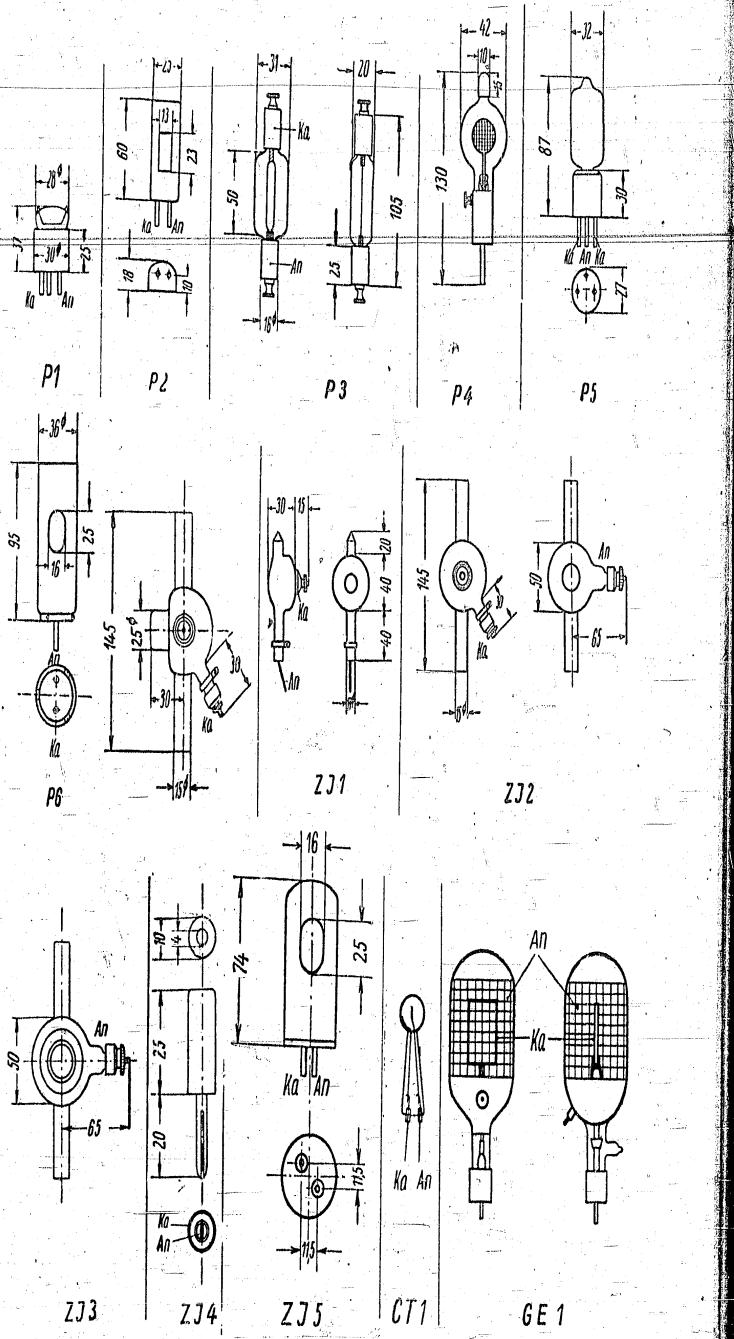


Tabelle 16

Firma	Zellenbezeichnung	Vakuumzelle V gasgefüllte Zelle G	Max. Betriebs- spannung in Volt	Empfind- lichkeit in $\mu\text{A}/\text{lm}$	Spektrale Verteilung
Günther u. Tegetmeyer		V			hydriertes Kalium hydriertes Natrium hydriertes Rubidium oder Kad- mium
		G			
Pressler	240 FE	GKE	G	60-120	5*)
		GIE, GII E	G	60-120	300 bzw. 500
	350 GG (ähnliche Typen 350 Pala u. 350 GZ)	GIE, GII E	G	60-120	300
	GKE				Cäsiumoxyd
	GKV	V	300	5	Kaliumoxyd
002 MX 2	GKE	G	60-120	30	
	GIV	V	300	60	
	GIE, GII E	G	60-120	300 bzw. 150	Cäsiumoxyd
	BCd V	V	300		Kadmium
	UNa V	V	300		
	UNa E	G	60-120		Natrium
	GKV	V	300	5	
320 TUMA	GKE	G	60-120	30	Kaliumoxyd
	GIV	V	300	60	
	GIE, GII E	G	60-120	300 bzw. 150	Cäsiumoxyd
	G 20 K E	G	60-120		blau- und rot empfindlich
	048 DS bzw. 048 SD	GIE	G		
	048 HM	GIE	G	60-120	300
					Cäsiumoxyd

Spezialzellen:	Photometerzelle	hochisoliert	Besonder
	Riesenzelle	Fernsehzelle (lichtempf. Fläche 190 cm ²)	
	Ringförmige Zelle	geeignet für Reflexionsabtastung	

*) Mindestempfindlichkeit bei 100 Volt und bezogen auf Normalhefnerlampe

(Fortsetzung)

Maße in mm ohne Steckerstifte	Licht- empfind- liche Fläche in cm ²	Art der Sockelung	Sonstige Kennzeichen	Schema der Zelle (vgl. Abb. 49)
a) Höhe b) Durchmesser				
s. Zeichnung		Spezial- halterung	geerdeter Schutzring Zellenkörper aus Uviol- oder Quarzglas	GT 1
a) 37 b) 30	8	Europasockel (Außen- kontaktsockel)	Frontzelle, Isolation gering	P 1
a) 60 b) 25	8	Zweistift- außen- kontaktsockel	Kleine Einbautype, dop- pelte Abstützung der Anode, daher erschütte- rungsfrei	P 2
a) 105 (ohne Bef.- Schrauben) b) 31	22	Spezial- halterung	Einbautype mit großer lichtempf. Fläche. Dop- pelte Abstützung der Anode, daher erschütte- rungsfrei	P 3
a) 130 (ein- schließlich Steckerstift) b) 42	12,5	Einstiftstecker, zweite Elek- trode seitlich	Planparallele Elektroden (homogenes Feld) Isolation $10^{12} \Omega$	P 4
a) 87 b) 32	16	Dreistift- röhrensockel	Höchstempfindliche Zellen für techn. Meßgeräte	P 5
a) 95 b) 36		Zweistiftsockel		P 6

Walzenzelle	Vakuumzelle mit Sättigung bei 2 Volt
Doppelanodenzelle	geeignet für Gegentaktschaltungen
Tonfilmzellen	Spezialzellen für die Geräte von Bauer, Erko, Kinoton, Klangfilm, Nitsche, Jovoton, Supra und Zeiss-Ikon

Tabelle 16

Firma	Zellenbezeichnung	Vakuum- gasgefüllte Zelle V Zelle G	Max. Bo- triebs- spannung in Volt	Empfind- lichkeit in $\mu\text{A}/\text{Im}$	Spektrale Verteilung	
Zeiß-Ikon	MV	V	300	20-45*	Cäsiumoxyd	
	MG	G	80-150	90-130		
	MVS	V	300	25-55	Cäsium- Antimon	
	MGS	G	80-150	90-130		
	MKV	V	300	20-45	Cäsiumoxyd	
	MKG	G	80-150	120-160		
	MKVS	V	300	25-55	Cäsium- Antimon	
	MKGS	G	80-150	130-170		
	MKVD	V	300	25-45	Cäsiumoxyd und Cäsium- Antimon	
	MKGD	G	80-150	130-160		
Spezialzellen: Tonfilmzellen	MKQVS	V	300		Cäsium- Antimon	
	MLVS	V	100	8-10	Cäsium- Antimon	
	TV	V	300	20-45**	Cäsiumoxyd	
	TZ	G	80-150	180-250		
	Besonderheiten					
	Spezialzellen für die Geräte von Zeiß-Ikon (höchstempfindlich, blau- und rotempfindlich) auch für Relaiszwecke anwendbar					

*) Bei 100 Volt und $T = 2360^\circ\text{K}$. **) Bei 100 Volt und $T = 2500^\circ\text{K}$.

(Fortsetzung)

Maß in mm ohne Steckerstifte	Licht- empfind- liche Fläche in cm^2	Art der Sockelung	Sonstige Kennzeichen	Schema der Zelle (vgl. Abb. 49)
a) 100 b) 45	12,5	Spezial- halterung	Meßzelle mit Erdungs- schelle, Isolation $10^{12} \Omega$	ZI 1
s. Zeichnung		Spezial- halterung	Meßzelle in Kugelform mit Erdungsschelle, Isola- tion mindestens $10^{13} \Omega$	ZI 2
s. Zeichnung		Spezial- halterung	Meßzelle in Kugelform mit Erdungsschelle, Isola- tion mindestens $10^{13} \Omega$ Quarzfenster, höchstemp- findliche Zelle für Ultra- violettmessungen	ZI 3
a) 25 b) 10	3	Einstiftstecker, zweite Elek- trode Gehäuse	Frontzelle in kleiner Aus- führung	ZI 4
a) 74 b) 36	10	(Zweistiftsockel) Amerikasockel	Relaiszelle (auch für Tonfilm)	ZI 5

Tab. 16 (Fortsetzung)

B: Ausländische Hersteller

154

Technische Ausführungsformen

Firma	Zellenbezeichnung der gebrauchlichsten Typen	Besonderheiten	Schema der Zelle (vgl. Abb. 49)
Baird-Television Ltd.		Cäsium-Antimon-Zellen	
Bell Telephone Laboratories, Inc.		Cäsiumoxydzeilen	
British Thomson-Houston Co. Ltd. Rugby (England)	Mazda	Cäsiumoxydzeilen, freistehende, halbkugel- drische Kathode, stabförmige Anode, Europasockel	
H. C. Bart, Pasadena (Kalifornien)	UV Na 2	Konstante Zelle für UV, Kathode Natrium	
E. Bolton King, Oxford	L	Kugelförmige Zellen (\varnothing 40 mm), Anode ringförmig, Kathode nach Wahl: Li, Na, K, Rb, Cu, Ba, und Ca	
Cinéma Prolabo, Paris		Cäsiumoxydzeilen, gasgefüllt, freistehende Kathode, haarnadelförmige Anode	
Cinéma Television Ltd.	Pea-Zelle	Miniaturlenzeile für biologische Messungen mit Cäsium-Antimonkathode (Empfindlichkeit $\sim 20 \mu\text{A/lm}$)	GT 1
Continental Electric Co., St. Charles	ütere Typen: Cetron Photocells (GE 868); neuere Typen: CE-5 WB; CE-5 AB; CE-1; CE-18; CE-1 NBS; CE-2; CE-2 NBS; CE-3; CE-4 WB; CE-5 RE; CE-4 RES	Cäsiumoxydzeilen, gasgefüllt, freistehende Kathode	
de Forest, Passaic (New Jersey)	Vis-Jon 602 Vis-Jon 668	Kugelzellen und Zellen mit zylindr. Form, Kaliumhydrid- bzw. Cäsiumoxydzeilen	
General Electric Co. (engl.)	Ceram Cells	Zentrale Kathode (Platte von einigen cm ²), Netzanode nach Art eines Faradaykäfigs um Kathode herum, Sättigungsspg. 4 V/ohm	GE 1
General Electric Co.	PJ 22, PJ 23, PJ 401, PJ 405	Cäsiumoxyd-, Natriumoxyd-, Rubidium- und Vakuum- und Gaszellen, freistehende Kathode, Amerika-Vierstiftsockel	
General Scientific Corp.	G 1, V 1, G 4, V 4, G 6, V 6, G 7, V 7, V 16, G 18 T, V 18 T	Cäsiumoxyd, Gas (G) und Vakuum (V)- Zellen, Amerika-Vierstiftsockel	
G. M. Laboratories, Inc., Chicago	Vistron 53 A, 53 AV, 58 A, 58 AV, 71 A, 71 AV, 75 A, 75 AV, 79 A, 79 AV	halbkugelr. freistehende Kathode, auf Wunsch Quarzglas, Cäsiumoxydakoden, Amerikasockel für 71 A und 71 VA	
Isenthal u. Co., Ducon Works, London	ZH 2, ZH 3, ZH 4	Kalium- und Cäsiumoxydzeilen, abgesetzte Anodenabschleife	
Moskauer Elektrolampen-Betrieb		Kugelzellen, jedoch nur Halbkugel mit lichtempfindlicher Schicht belegt, Cäsiumoxyd- Kathoden, Vakuum- und Gaszellen	
National Carbon Company, New York	Eveready Raytheon 3 GS, 3 VS, 3 GP, 3 VP, 4 GP, 4 VSM	Kalium- und Cäsiumzellen, Gas- und Vakuumzellen, freistehende Kathode	
N. V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven	3510, 3511, 3512, 3513, 3530, 3531, 3533, 3534	Cäsiumoxydzeilen, Doppelphotorzeile (920 gasgefüllt), Amerikasockel, außer 921 und 922 (Patronentypen), 919 hohe Isolation, freistehende Kathode	RCA 1 (Patronentypen)
R. C. A.	868, 917, 918, 922, 923, 919, 920, 921, 927, 924, 926, 929		

§ 1. Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

155

Den Anstoß dazu gaben Untersuchungen der Sekundäremission von Cäsiumoxydschichten auf Platten (ZWORYKIN) und auf Netzen (KLUGE-WEISS). Der Vorteil dieser Verstärkungsart, wie noch gezeigt wird, ist in verbesserten Rauschverhältnissen und in der Frequenzunabhängigkeit bis zu hohen Frequenzen zu sehen.

Im Prinzip ist es für den Vervielfacherteil (KaS_1, KaS_2, \dots) gleichgültig, woher der Primärelektronenstrom stammt. Der ersten Stufe KaS_1 kann daher an Stelle eines Photoelektronenstromes ebenso gut ein Glühelektronenstrom zugeführt werden. Auf Grund dieser Tatsache sind bereits gittergesteuerte Glühkathodenvervielfacher hergestellt worden, die den normalen Röhren gegenüber eine erhöhte Steilheit dann aufweisen, wenn im Anlaufstromgebiet gearbeitet wird. Auch an den Ersatz der Glühkathode in BRAUNSchen Röhren durch einen Vervielfacher ist gedacht worden.

b) Einteilung der Vervielfacher

Wenn der Elektronenstrom von Stufe zu Stufe, ein hoher Sekundär-emissionskoeffizient δ vorausgesetzt (vgl. III, § 2b und V, § 2e und f), anschwellen soll, so muß darauf geachtet werden, daß jeweils alle Elektronen einer Stufe auf die folgende Stufe auftreffen und sich nicht durch seitliches Vorbeifliegen an den Elektroden der Vervielfachung entziehen. In den ersten Stufen, d. h. für kleine Elektronenströme, dürften besondere Konzentrationsmittel nicht immer nötig sein. Bei einer größeren Stufenzahl jedoch muß dafür gesorgt sein, daß jede Stufe auf die folgende elektronenoptisch abgebildet wird, wenn auch, abgesehen von dem Fall, daß ganze Elektronenbilder vervielfacht werden sollen, sehr hohe Bedingungen an die Abbildung nicht gestellt zu werden brauchen. Es werden daher lichtelektrische Vervielfacher ohne besondere Fokussierung, mit elektrostatischer und mit magnetischer Fokussierung zu unterscheiden sein, wobei noch darüber gestritten werden könnte, ob nicht im letzten Falle von gemischt elektrostatisch-magnetischer Fokussierung gesprochen werden müßte. Daneben sind verschiedene Wege möglich, um die Sekundärkathoden zweckmäßig anzuordnen und auszubilden bzw. die Zahl der Sekundärkathoden trotz eines hohen Verstärkungsgrades durch Anwendung hochfrequenter Felder auf ein Minimum zu beschränken. Dies führt

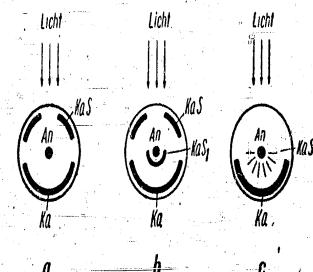
zur Unterteilung in statische und dynamische Vervielfacher. Die Tabelle 17 soll den Überblick erleichtern. In der weiteren Betrachtung wird nur auf lichtelektrische Vervielfacher zurückgegriffen.

Tab. 17. Übersicht über ausgeführte lichtelektrische Vervielfacher

	Ohne Fokus- sierung	Elektrostatische Fokussierung	Magnetische Fokussierung
Statisch	Photozellen mit einstufiger Ver- stärkung ^{199) 200)}	T- und L-Verviel- facher ²⁰¹⁾ Netzverviel- facher ^{202) 200)} Netzverviel- facher ^{200) 205)}	Vervielfacher mit magnetischem Querfeld ²⁰⁴⁾ Netzverviel- facher ^{200) 205)}
Dynamisch		Pendelvervielfacher mit Hohlkatho- den ²⁰⁶⁾ Einkathoden- vervielfacher ²⁰⁷⁾	Pendelvervielfacher mit magnetischem Längsfeld ²⁰⁶⁾ Vervielfacher mit magnetischem Querfeld ²⁰⁸⁾ Axialsymmetrischer Vervielfacher ²⁰⁹⁾

c) Photozellen mit einstufiger Verstärkung

Die einfachste Form einer Photozelle mit einstufiger Verstärkung ist in Abb. 52a gezeigt. Von der Kathode Ka werden Photoelektronen ausgelöst, die durch das Feld, hervorgerufen durch das positive Potential der Sekundärkathode KaS und das der Anode An , beschleunigt werden und ihrerseits aus KaS Sekundärelektronen herausschlagen. Die Sekundärelektronen fliegen sodann zur Anode An , deren Potential zweckmäßig positiver als das von KaS gewählt wird. Um zu ver-

Abb. 52
Photozellen mit einstufiger Verstärkung.

meiden, daß sich nicht ein großer Teil der Primärelektronen, nämlich die, die dem positiven Potential der Anode A_n gemäß gleich zu dieser fliegen, dem Vervielfachungsprozeß entziehen, kann die Anode, wie in Abb. 52b dargestellt ist, gegen die Kathode Ka durch eine Hilfskathode KaS_1 in halbzylindrischer Form, die auf der der Kathode Ka zugewandten Seite auch sekundäremissionsfähig sein kann, abgeschirmt werden. Die Primärelektronen können daher von der Anode nicht abgesaugt werden, hingegen aber die Sekundärelektronen, die zum Teil sogar zweifach verstärkt worden sind, weil an KaS_1 sekundär ausgelöste Elektronen an KaS selbst wieder auszulösen vermögen. In V, § 2c ist erwähnt worden, daß ein schräg auf die Emissionsfläche fallender Primärstrahl mehr Sekundärelektronen herausschlägt als ein senkrecht einfallender. Man wird daher mit Vorteil auch eine in Abb. 52c angedeutete Konstruktion wählen können. Wiederum werden die aus Ka ausgelösten Photoelektronen auf die Sekundärkathode KaS geworfen. Diese ist jedoch fächerförmig um die Anode A_n angeordnet, so daß die Photoelektronen jeweils unter einem Winkel auf die Emissionsfläche von KaS fallen, bei dem eine höhere Sekundäremission gewährleistet ist als bei senkrechtem Auffall der Primärelektronen.

d) L- und T-Vervielfacher

Mehrere Vervielfacherstufen erfordern, wie erwähnt, die Anwendung besonderer Mittel, um die aus einer Kathode ausgelösten Elektronen auf die nächste abzubilden.

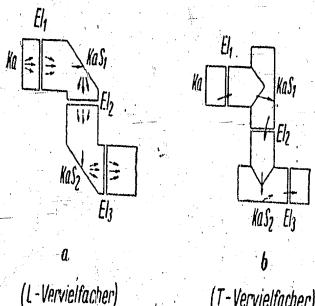


Abb. 53. L- und T-Vervielfacher.

einer Beschleunigungslinse El_1 auf die Sekundärkathode KaS_1 abgebildet, wo sie Sekundärelektronen auslösen. Das gleiche Spiel

Sowohl der L- als auch der T-Vervielfacher (Abb. 53a und b) genügen in dieser Hinsicht den Anforderungen. Die der Kathode Ka , beispielsweise einer auf die Röhrenwand aufgebrachten durchsichtigen Photokathode, entstammenden Elektronen werden mit Hilfe

§ 2. Vervielfacher

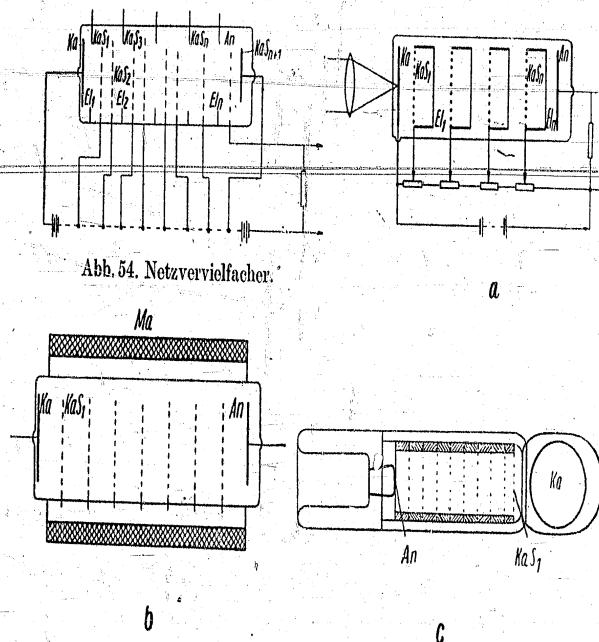
kann beliebig oft mit den an der Sekundärkathode austretenden Elektronen wiederholt werden, jedoch ist das jeweils folgende System, bestehend aus Beschleunigungslinse und Sekundärkathode, um 90° gegen das vorhergehende versetzt. Der Unterschied zwischen dem L- und dem T-Typ besteht darin, daß beim L-Typ die Elektronen unter 45° auf die Sekundärkathode fallen, beim T-Typ jedoch senkrecht. Die Vergrößerung des Elektronenbildes wird gleich eins gewählt. Der L-Vervielfacher verlangt, um einen begrenzten Auffallbereich der Elektronen auf den nachfolgenden Kathoden zu erhalten, eine scharfe, kleine Emissionszone auf der lichtelektrischen Kathode, während dies beim T-Typ nicht im gleichen Maße notwendig ist. Außerdem ist der L-Vervielfacher schon bei verhältnismäßig niedrigen Strömen raumladungsbegrenzt.

e) Netzvervielfacher

Soll das ganze Vervielfachersystem in einer Achse liegen, so muß man zu hintereinander angeordneten dünnen, sekundäremissionsfähigen Schichten greifen, bei denen also die Primärelektronen auf der Vorderseite eintreten und die Sekundärelektronen auf der Rückseite die Folie verlassen. Im Augenblick lassen sich wohl derartige Folien mit guter Sekundäremission herstellen, jedoch läßt die mechanische Festigkeit zu wünschen übrig. Es muß daher zu emissionsfähigen Netzen, die hintereinander anzurichten sind, greifen werden (Netzvervielfacher). Die Photoelektronen werden zunächst auf das erste Netz KaS_1 (vgl. Abb. 54) beschleunigt. Ein großer Teil der Elektronen wird an den Gitterdrähten des ersten Netzes Sekundärelektronen auslösen, der Rest durch die Maschen unverstärkt hindurchfliegen. Dieser Vorgang wiederholt sich an den Netzen KaS_2, \dots, KaS_n . Vom Anodenetz A_n wird dann, nachdem der ganze Vervielfachungsprozeß durchlaufen worden ist, ein Teil der Elektronen aufgenommen, die hindurchfliegenden hingegen werden zusätzlich an der besonders hoch verstärkenden Platte KaS_{n+1} vervielfacht, ehe sie ebenfalls auf das Anodenetz A_n fallen. Wesentlich ist nun die Konzentration der Elektronen auf die Netze, die elektrostatisch oder magnetisch erfolgen kann, damit die Elektronen nicht auseinanderlaufen. In Abb. 54a sind zwischen den Netzen ringförmige Blenden oder Ringe El_1, \dots, El_n angeordnet,

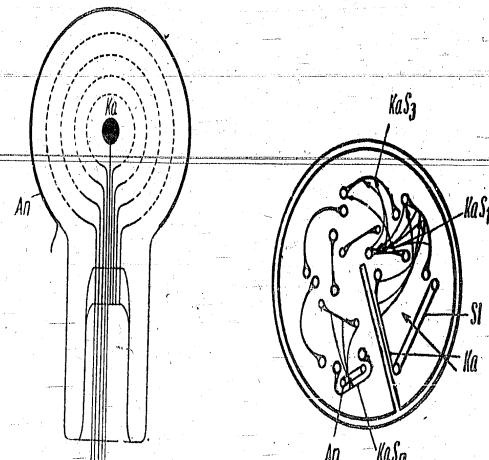
Görlich, Die lichtelektrischen Zellen

die als elektrostatische Elektronenlinsen wirken. Man kann auch über das ganze Rohr eine lange Magnetspule Ma schieben (Abb. 54b). Als Netzvervielfacher mit magnetischer Fokussierung muß man auch



jenen ansehen, bei dem die Konzentration durch elektrostatische Wandladungen erreicht wird. Der technisch zweckmäßigste Aufbau wird erzielt, wenn Distanzringe aus Glas oder Keramik zwischen den einzelnen Netzen angeordnet werden (Abb. 54c). Für alle Netzvervielfacher ist eine Maschenzahl optimal (etwa 10000 Maschen/cm²)²¹⁰. Bei zu großer Maschenweite entziehen sich zuviel Elektronen der Vervielfachung, hingegen ist bei zu kleiner Maschenweite der Durchgriff zu gering. Ein gewisser Durchgriff ist jedoch im Netzvervielfacher notwendig, damit diejenigen Sekundärelektronen, die entgegen der Richtung der einfallenden Primärelektronen austreten, sofort durch die Maschen zum folgenden Netz hindurchgezogen werden. Um Raumladungseffekte im Netzvervielfacher möglichst zu vermeiden, empfiehlt sich eine Anordnung (Abb. 55) mit zentraler Kathode und mit Netzen, die in Kugelform konzentrisch um die Kathode herum an-

geordnet sind. Als Anode dient entweder ein durchsichtiger oder mit Fenster für den Lichteintritt versehener dicker, auf die Röhrenwand aufgebrachter Metallbelag oder das äußerste Kugelnetz. Im letzten



Fall kann überdies ein durchsichtiger Belag auf der Röhrenwand sekundäremissionsfähig ausgebildet sein, so daß die Röhrenwand als letzte Sekundärkathode anzusehen ist.

f) Vervielfacher mit elektrostatisch bündelnden Elektroden

Eine besonders elegante Form stellen die Vervielfacher mit elektrostatisch bündelnden Elektroden dar. In Abb. 56 bedeutet Ka wieder die Photokathode, die, um Wandladungen zu vermeiden, durch eine lichtdurchlässige Schicht, etwa eine halbdurchlässig verspiegelte Glasplatte Gl oder ein Drahtnetz, geschützt ist. Die Elektronen fliegen in der in der Zeichnung angedeuteten Weise der Reihe nach auf die Sekundärkathoden KaS_1, \dots, KaS_n , wo sie beim Aufprall jeweils dem Vervielfachungsprozeß unterworfen sind, und werden darauf von der Anode An gesammelt. Die Anode An besteht aus einem Netz und ist von der Sekundärkathode KaS_n umschlossen. Die Elektronen der vorletzten Sekundärkathode finden durch die Form von KaS_n ein stark bündelndes Feld vor. In Abb. 56 sind die Verstärkerstufen in Kreisform

angeordnet. Sie können ebensogut in Längsform aufgebaut werden, wie man aus Abb. 57 ersehen kann. Auch die Form der elektrostatisch bündelnden Elektroden läßt sich variieren.

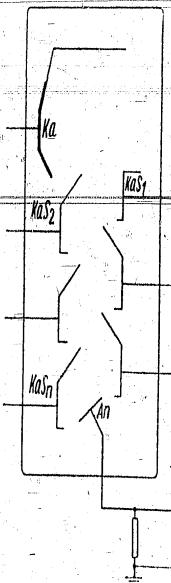


Abb. 57. Vervielfacher mit elektrostatisch bündelnden Elektroden (Längsform).

g) Vervielfacher mit magnetischem Querfeld
Vervielfacher mit magnetischem Querfeld bedürfen den bisher behandelten Vervielfachern gegenüber eines größeren Aufwandes. Die Kathodenplatten müssen nebeneinander angeordnet sein (vgl. Abb. 58). Aus der Photokathode Ka austretende Elektronen werden auf die Sekundärkathode KaS_1 konzentriert und lösen dort Sekundärelektronen aus. Diese wiederum unterliegen durch Aufprall auf KaS_2 ihrerseits dem Vervielfachungsprozeß und so fort, bis der vervielfachte Elektronenstrom von der mit einem Schirmnetz (elektrostatische Abschirmung bei Schwankungen des Potentials von An) versehenen Anodenplatte An aufgenommen wird.

Wie bei allen bisher beschriebenen Vervielfachern ist auch hier jeweils KaS_n positiver als KaS_{n-1} . Die den nebeneinander angeordneten Platten gegenüberstehenden, also KaS_1, KaS_2, \dots , sind immer mit der nächstfolgenden Platte der ersten Reihe verbunden, also KaS_1 mit KaS_1 und so fort. Sie

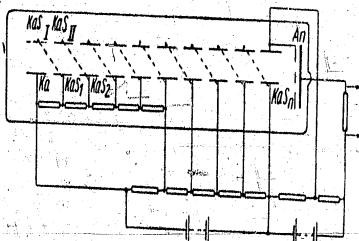


Abb. 58. Vervielfacher mit magnetischem Querfeld.
rufen auf diese Weise lediglich ein transversales elektrisches Feld hervor. Durch die Verbindung der Elektroden KaS_1, KaS_2, \dots , die auch an eine geson-

derte Spannungsquelle angeschlossen sein könnten in der angegebenen Weise, lassen sich Durchführungen durch die Rohre nach außen einsparen, ebenso dadurch, daß man für die ersten Stufen die Spannungsteilerwiderstände R_1, R_2, \dots in das Rohr einbaut. Letztere Maßnahme kann natürlich auch bei allen anderen, insbesondere bei den Netzvervielfachern, getroffen werden. Mit einem senkrecht zu dem transversalen elektrischen Feld stehenden magnetischen Feld wird die Konzentration der Elektronen auf die Platten der Reihe KaS_1, KaS_2, \dots erzielt. Der Bündelquerschnitt kann nach allen Seiten klein gehalten werden, wenn die Elektroden mit vertikalen Glimmerstreifen versehen werden. Durch Wandladungen auf den Glimmerstreifen tritt eine zusätzliche Linsenwirkung ein.

Den geringsten Mehraufwand, den ein Vervielfacher mit magnetischem Querfeld braucht, hat man wohl dann, wenn man einen Permanentmagneten verwendet und berücksichtigt, daß der Luftspalt klein gehalten werden muß. Mancherlei Vorteile (z.B. Kühlung der Elektroden) lassen sich erreichen, wenn man die Plattenreihe durch entsprechende aufeinanderfolgende metallische Niederschläge auf der Röhreninnenwand, wobei eine der Reihen emissionsfähig sein muß, ersetzt^[211]. Allerdings sind bei dieser Art der Konstruktion Schwierigkeiten in bezug auf die Isolation in Kauf zu nehmen.

h) Dynamische Vervielfacher

Die bisher beschriebenen Vervielfacher fallen unter die Gruppe der statischen Vervielfacher (vgl. Tab. 17). Von diesen unterscheiden sich in ihrer Arbeitsweise grundsätzlich die dynamischen Vervielfacher, von denen als der bekannteste Vertreter der Pendelvervielfacher mit longitudinalem Magnetfeld bzw. mit Hohlkathode zu nennen ist (Abb. 59) (im englischen Schrifttum auch „radio frequency type multiplier“ genannt).

Die beiden sich in wenigen

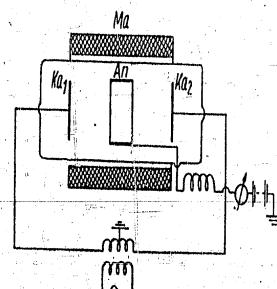


Abb. 59. Pendelvervielfacher mit longitudinalem Magnetfeld.

Zentimeter Abstand gegenüberstehenden Platten Ka_1 und Ka_2 müssen sowohl sekundäremissionsfähig als auch lichtempfindlich sein. Zwischen Ka_1 und Ka_2 liegt ein hochfrequentes Wechselfeld (etwa 10^6 Hz). Die zylindrische Anode An zwischen Ka_1 und Ka_2 erhält eine dem Mittelwert der Wechselspannung gegenüber positive Spannung. Um zu verhindern, daß Elektronen, die zwischen den Platten Ka_1 und Ka_2 pendeln, zu früh auf die Anode fallen, muß entweder ein Magnetfeld, welches senkrecht zu Ka_1 und Ka_2 steht, vorhanden sein, oder die Platten Ka_1 und Ka_2 müssen als Hohlkathoden ausgebildet sein. Trägt man den Anodenstrom über der Anodenspannung auf, so erkennt man drei Maxima. Sie lassen sich durch die Annahme erklären, daß im Falle der Vervielfachung die Laufzeit der Elektronen zwischen den Platten gleich $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ Perioden sein kann. Der Vervielfachungsvorgang geschieht in folgender Weise: es werde ein Photoelektron zu einer Zeit aus Ka_1 ausgelöst, wo die Wechselspannung gerade durch Null geht und Ka_2 positiv ist. Das Elektron wird nach $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ Perioden auf Ka_2 ankommen und Sekundärelektronen herausgeschlagen, die ihrerseits ein Feld vorfinden, welches entgegengesetzt gerichtet ist und wodurch sie auf Ka_1 beschleunigt werden. Auf Ka_1 wiederholt sich dann der gleiche Emissionsvorgang unter dem Wechsel der Feldrichtung und so fort, bis etwa durch Raumladungseffekte ein Grenzwert des vervielfachten Stromes erreicht wird. Voraussetzung dafür, daß der Vervielfachungsprozeß in der gewünschten Weise vor sich geht, ist, daß die Auslösezeit eines Sekundärelektrons klein ist gegen die Periode der Wechselspannung, was jedoch bis 10^6 Hz erfüllt sein dürfte. Neben den Elektronen, die gerade ausgelöst werden, wenn die Wechselspannung durch Null geht, also den sogenannten „phasenreinen“ Elektronen, nehmen noch diejenigen Elektronen an der Vervielfachung teil, die eine Phasendifferenz bis zu 65° besitzen. Es zeigt sich, daß diese Elektronen nach und nach in Phase kommen, während alle übrigen infolge ungünstiger Auslösezeit für den Vervielfachungsprozeß ausfallen.

In konsequenter Fortführung der Überlegungen läßt sich aus dem Pendelvervielfacher der Einkathodenvervielfacher entwickeln. In Abb. 60 ist die Kathode Ka_2 so stark negativ vorgespannt, daß die an Ka_1 ausgelösten Elektronen die Elektrode Ka_2 nicht erreichen.

Wird der Vorspannung von Ka_2 eine Hochfrequenzspannung richtig überlagert, was bei geeigneter Wahl des Verhältnisses der Plattenvorspannung zur Amplitude des Wechselfeldes möglich ist, so werden

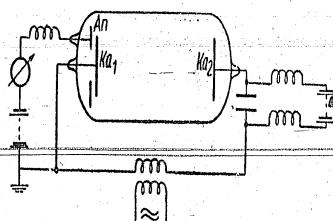


Abb. 60. Einkathodenvervielfacher.

die Elektronen auf Ka_1 zurückfallen und Sekundärelektronen auslösen. Nach mehreren Pendelungen werden die Elektronen von einem Ring An , der positiv vorgespannt ist und sich hinter Ka_1 befindet, aufgesammelt. Der Vorteil, den der Einkathodenvervielfacher dem Pendelvervielfacher gegenüber hat, ist der, daß bei fester Wahl des Verhältnisses Plattenvorspannung zur Amplitude des Wechselfeldes der Einkathodenvervielfacher unabhängig von der Frequenz arbeitet. Die Rechnung zeigt, daß nicht die Elektronen, die beim Feld Null starten, an der Vervielfachung teilnehmen, sondern lediglich die Elektronen, deren Phasen zwischen 15 und 50° liegen. Bis zu einer 300fachen Verstärkung ist ein stabiles Arbeiten des Einkathodenvervielfachers sicher.

Beispiele für dynamische Vervielfacher mit magnetischem Querfeld zeigen die Abb. 61a und b und schließlich für einen axialsymmetrischen

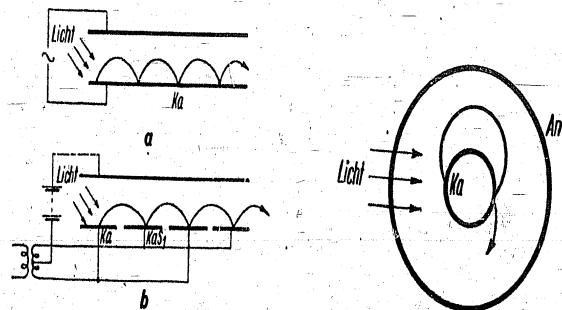
Abb. 61
Dynamischer Vervielfacher mit magnetischem Querfeld.

Abb. 62. Axialsymmetrischer Vervielfacher mit magnetischer Ablenkung.

trischen Vervielfacher mit magnetischer Ablenkung die Abb. 62. Die Elektronen bewegen sich auf zykloidenförmigen Bahnen und lösen beim Aufprall auf Ka jeweils Sekundärelektronen aus.

i) Rechnerische Behandlung der statischen Vervielfacher

Für eine technische Anwendung haben sich bisher lediglich die statischen Vervielfacher bewährt. Es soll daher die rechnerische Behandlung²¹²⁾ nur auf diese bezogen sein.

Der Sekundäremissionskoeffizient einer Stufe sei δ (vgl. III, § 2b). Nur unter den Bedingungen, daß sämtliche Elektronen der $(n-1)$ -ten Stufe die n -te Stufe tatsächlich erreichen und daß keines der von der n -ten Stufe ausgelösten Sekundärelektronen wieder auf die n -te Stufe zurückfällt, ist die Verstärkung der n -ten Stufe

$$v_n = \delta_n. \quad (67)$$

Sind diese beiden Bedingungen nicht erfüllt, gilt an Stelle der Gleichung (67)

$$v_n = w_n \delta_n, \quad (68)$$

wobei w_n den Wirkungsgrad der n -ten Stufe darstellt. Wie bei einem Elektronenröhrenverstärker, bei dem die erste Röhre die Verstärkung v_1 , die zweite v_2 und so fort ergibt und die Gesamtverstärkung nach Hintereinanderschalten der Röhren durch das Produkt aller einzelnen Verstärkungen bestimmt ist, gilt auch für einen statischen Vervielfacher, daß die Gesamtvervielfachung durch das Produkt

$v_{\text{ges}} = w_1 \delta_1 \cdot w_2 \delta_2 \dots w_n \delta_n$ oder $v_{\text{ges}} = w_{\text{ges}} \delta_1 \cdot \delta_2 \dots \delta_n$ (69) gegeben ist. Hat der von der Photokathode gelieferte Photostrom die Größe $i_{ph} = C \Phi$ [Gleichung (15)], so kann im Ausgang des n -stufigen Vervielfachers der Strom

$$J_{ph} = i_{ph} v_{\text{ges}} \text{ bzw. } J_{ph} = C \Phi v_{\text{ges}} \quad (70)$$

abgenommen werden. Wie aus V, § 2a hervorgeht, ist δ abhängig von der angelegten Stufenspannung e . Ist die Gesamtspannung $e_{\text{ges}} = \sum_{a=1}^n e_a$ gegeben, so ist sowohl $\prod_{a=1}^n \delta_a$ als auch w_{ges} von der Aufteilung der Gesamtspannung auf die n Stufen abhängig. Im allgemeinen wird die zur Verfügung stehende Gesamtspannung so auf die n Stufen verteilt, daß v_{ges} ein Maximum wird, jedoch gibt es Fälle, in denen es sich lohnt, eine gleichmäßige Spannungsverteilung pro Stufe

durchzuführen. Für eine festgelegte Spannungsverteilung bleibt sowohl w_n als auch w_{ges} für alle statischen Vervielfacher ohne magnetische Fokussierung nahezu konstant, wenn e_{ges} geändert wird, weil eine proportionale Änderung aller Potentiale der elektronenoptischen Anordnung unter der Voraussetzung, daß die Elektronen mit der Energie Null austreten, die Elektronenbahnen nicht verändert. Zwar ist die Voraussetzung nicht voll erfüllt, die Abweichungen sind jedoch gering. Während für Vervielfacher mit magnetischer Fokussierung, bei denen das magnetische und elektrische Feld gleichmäßig geändert wird, die Konstanz von w_n bzw. w_{ges} allenfalls noch gewährleistet ist, ist dies für Vervielfacher mit konstantem magnetischem Feld sicher nicht mehr der Fall.

Die Berechnung eines statischen Vervielfachers wird dann besonders einfach, wenn die Verstärkung pro Stufe bei gleicher Stufenspannung gleich ist, wenn also $v_1 = v_2 = \dots = v_n = v$ gilt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, an Stelle von v den $\log v$ einzuführen. Es gelten dann für einen n -stufigen Vervielfacher die Gleichungen

$$\log v = f(e), \quad (71)$$

$$e_{\text{ges}} = n e, \quad (72)$$

$$v_{\text{ges}} = v^n \text{ bzw. } \log v_{\text{ges}} = n \log v \quad (73)$$

und an Stelle der Gleichung (70)

$$J_{ph} = i_{ph} v_{\text{ges}} \text{ bzw. } J_{ph} = C \Phi v_{\text{ges}}. \quad (74)$$

In Gleichung (72) ist die Absaugspannung der nicht vervielfachten Anode A_n nicht mit enthalten.

Trägt man den $\log v$ über e auf [vgl. Gleichung (71)], so erhält man eine Kurve, wie in Abb. 63 dargestellt. Sie läßt sich nach MAUERER als Stufenkennlinie ansehen, wie man auch die Abhängigkeit $\log v_{\text{ges}} = F(e_{\text{ges}})$ mit Vervielfacherkennlinie bezeichnen kann. Aus den Gleichungen (72) und (73) ergibt sich

$$\frac{e_{\text{ges}}}{e} \log v = \log v_{\text{ges}}. \quad (75)$$

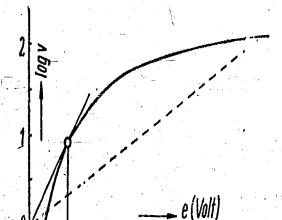


Abb. 63. Stufenkennlinie eines Vervielfachers.

I) Anwendung der rechnerischen Ergebnisse

Als Beispiel für die Anwendung der Gleichungen (71), (72) und (75) sei die Aufgabe gestellt, die optimale Stufenspannung zu berechnen, wenn die gewünschte Vervielfachung v_{ges} vorgegeben ist. Für diese optimale Stufenspannung ist das wirtschaftlichste Arbeiten des Vervielfachers gewährleistet. Das gewünschte v_{ges} lässt sich prinzipiell auf die verschiedenartigste Weise erzielen, es lässt sich entweder die Stufenzahl n oder die Stufenspannung e oder beides ändern. Die Aufgabe kann daher auch anders formuliert werden: Es ist das Wertepaar (e, n) zu suchen, für das e_{ges} ein Minimum wird. In Gleichung (75) muß also für ein Minimum von e_{ges} der Faktor $\log v/e$ ein Maximum werden. Die Größe $\log v/e$ stellt die Neigung des Fahrstrahles vom Koordinatenanfangspunkt zum Punkte $(e, \log v)$ dar und wird ein Maximum, wenn der Fahrstrahl Tangente an die Stufenkennlinie wird. Die Abszisse des Berührungspunktes e_{opt} ist die gesuchte optimale Stufenspannung. Wegen der Gültigkeit der Gleichung (75) kann e_{opt} auch aus der Vervielfacherkennlinie bestimmt werden, denn Stufenkennlinie und Vervielfacherkennlinie gehen durch Koordinatentransformation $1:n$ ineinander über. Die optimale Stufenspannung ist unabhängig von v_{ges} und n .

Die Gleichungen (67) bis (75) gestatten alle Aufgaben zu lösen, die sich auf den Betrieb und die Dimensionierung der statischen Vervielfacher beziehen, sei es, daß bei gegebener Gesamtspannung und vorgeschriebener Vervielfachung die Stufenspannung bestimmt werden muß, oder sei es, daß für verlangte Vervielfachung und festgelegte Stufenzahl die Gesamtspannung ermittelt werden soll oder sei eine ähnliche Aufgabe gestellt. Besonders interessant ist der Fall, in dem das Auflösungsvermögen des Vervielfachers für kurz hintereinander einfallende Lichtsignale genügend groß sein soll (vgl. X, § 2). Die durch ein Photoelektron an den aufeinanderfolgenden Stufen ausgelösten Sekundärelektronen sollen in einem Zeitintervall auf die Anode treffen, das sicher vom nächsten Intervall zu unterscheiden ist, oder anders ausgedrückt, der Streubereich für die Elektronenlaufzeiten soll möglichst klein sein. Die Forderungen an den Vervielfacher sind für diesen Fall, wie die Rechnung ergibt, geringe Stufenzahl und hohe Stufenspannung.

§ 2. Vervielfacher

I) Praktisch erreichbare Werte

Um einen Anhaltspunkt zu geben, welche Vervielfachung für einen n -stufigen Vervielfacher zu erreichen ist, sei auf die Abb. 64a und b

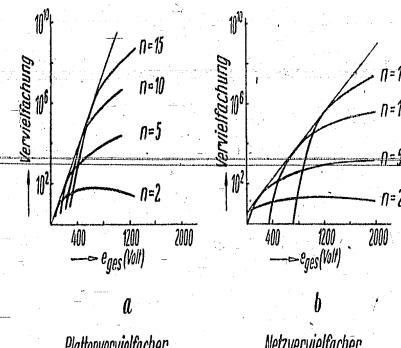


Abb. 64. Vervielfachung
in Abhängigkeit von der Gesamtspannung und der Stufenzahl.

verwiesen. Zwar sind an Einzelexemplaren die in der Abbildung angegebenen Werte erreicht worden (δ für Cs_2O -Schichten > 8), in der Serienfertigung jedoch liegen die Werte erheblich niedriger (δ für Cs_2O -Schichten zwischen 2,5 und 4,5). Bei vielstufigen Vervielfachern liegen die Herstellungsschwierigkeiten am Formierprozeß (vgl. auch V, § 2e). Die in Abb. 64 gewählte Darstellung des Wirkungsgrades eines Vervielfachers ist von praktischer Bedeutung. Man kann jedoch auch den Wirkungsgrad eines Vervielfachers (nach ZWORYKIN) als den einer Elektronenquelle auffassen (in Einheiten mA/Watt) aufgenommene Leistung.

Aus der Abhängigkeit δ von e_p läßt sich leicht die Stromausbeutekurve (Abb. 65) gewinnen. Aus ihr liest man ab, daß das Maximum bei 30 V mit einer Emission von 60 mA/Watt liegt und daß die Kurve

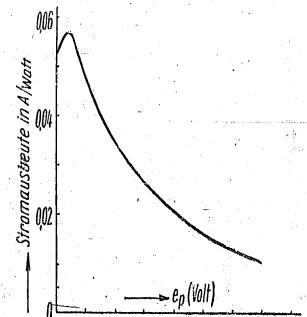


Abb. 65. Stromausbeute bei der Sekundär-Elektronenemission einer Cs_2O -Schicht.

bis auf 10,5 mA/Watt bei 700 V abfällt, wenn die Sekundäremission einer Cs_2O -Schicht ins Auge gefaßt wird.

Die Tab.18 soll einen Anhaltspunkt über serienmäßig erhältliche Vervielfacher geben. Es ist verständlich, daß sich ein Vervielfacher nicht für jeden Verwendungszweck eignet, daher sucht man in der Tabelle einen großen Teil der Photozellen herstellenden Firmen (vgl. Tab.16) vergeblich. Nicht listenmäßig erfaßte Vervielfacher liefern in Deutschland die Firmen AEG, Fernseh GmbH. und Zeiß-Ikon AG.

In der UdSSR. verwendet man vorzugsweise magnetische Vervielfacher mit 14 Stufen und einer Empfindlichkeit von $\sim 30 \text{ A/lm}$. Als Photokathoden werden Cäsiumoxydschichten sowie Sb, Cs-Cs-Schichten und als Sekundärkathoden Cu-S-Cs-Kathoden benutzt²¹³⁾.

§ 3. Zellen mit innerem lichtelektrischen Effekt (Widerstandszellen)

a) Zellen für Längs- und Querfeldbeleuchtung

Die große Mannigfaltigkeit der Ausführungen, wie man sie von den Photozellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt (IX, § 1) und von den Vervielfachern (IX, § 2) gewohnt ist, wird man für Photozellen mit innerem lichtelektrischen Effekt vergeblich suchen. Man teilt entsprechend der Abb.10 (II, § 4a) die Zellen einmal in solche mit Querfeldbeleuchtung und zum anderen in solche mit Längsfeldbeleuchtung ein. Der häufigere Fall ist der der Querfeldbeleuchtung, wobei das Licht senkrecht zur Stromrichtung einfällt. Im Falle der Längsfeldbeleuchtung hingegen laufen Licht und Strom parallel. Die Zellen mit Längsfeldbeleuchtung sind den Sperrschichtzellen ähnlich aufgebaut, weil sie wenigstens eine lichtdurchlässige Elektrode erfordern. Auf eine Unterlage, die eine der Elektroden darstellt, wird der lichtempfindliche Halbleiter in dünner Schicht aufgebracht und mit einer dünnen lichtdurchlässigen Metallschicht als zweite Elektrode versehen. Es steht einer Ausführung mit zwei lichtdurchlässigen Elektroden, bei der also die Zelle wahlweise von der einen bzw. von der anderen Seite belichtet werden kann, kein Hindernisgrund entgegen. Natürlich ist die Fertigung einer solchen Zelle schwieriger. Entweder

Tab. 18. Überblick über technische Photoelektronenvervielfacher

Firma	Zellen- bezeichnung	Betriebsbedingungen	Stufen- zahl	Art des Vervielfachers (vgl. Tabelle 17)	Photokathode	Sonstige Kennzeichen
Baird Television Ltd.	MS ML	3000 V maximale Gesamtspannung	9 5	Netzvervielfacher	Cäsiumoxyd	Wirksame Kathoden- fläche 15 cm ²
S. V. Philips Gloei- lampenfabriken	3520	650 V Gesamtspannung	3	Vervielfacher mit elektrostatisch bün- delnden Elektroden	Cäsiumoxyd	Wirksame Kathoden- fläche 250 cm ²
Preßler	S 163	minimal 400 V	1	Photozelle mit ein- stufiger Verstärkung	Cäsiumoxyd	
R C A	931	2000 V Gesamtspannung	9	Vervielfacher mit elektrostatisch bün- delnden Elektroden	blauempfindlich	
Société Française Radioélectrique	M. S. 10	Maximale Gesamt- spannung 1500 V, maximale Stufenspan- nung 150 V, magneti- sches Feld 100—200 Orsted	9	Vervielfacher mit magnetischem Quer- feld	Cäsiumoxyd	Maximaler Anodenstrom 5 mA im Dauerbetrieb
Western Electric	D 159 076	750 V Gesamtspan- nung (größter Wert), Stufenspan- nung 100—150 V	6	Vervielfacher mit elektrostatisch bün- delnden Elektroden	Cäsiumoxyd	

§ 3. Zellen mit innerem lichtelektrischen Effekt

kammartig ineinandergreifenden Elektroden mit den dazwischenliegenden Isolationsstreifen auf der Hochkantseite zum Träger für die lichtempfindliche Schicht werden kann. Auf den gut zusammengepreßten Elektrodenraster wird alsdann das lichtempfindliche Material aufgebracht und formiert. In ähnlicher Weise kann ebenso gut die Hochkantseite eines Wickelkondensators an Stelle eines Plattenkondensators als Schichtunterlage Verwendung finden. Die Kondensatorzellen haben für die Serienfertigung immerhin einige Vorteile, jedoch sind sie wegen ihrer

hohen Kapazität nur für sehr niedrige Frequenzen anwendbar.

Die dritte Art von Zellen sind die geritzten oder gravierten Zellen (LIESEGANG, FOURNIER D'ALBE, BERGLUND).

Wie in Abb. 68 gezeigt, wird eine mit einer Metallschicht versehene Isolationsplatte

mäanderförmig geritzt, so daß die zwischen den Elektroden verbleibenden Stellen mit dem lichtempfindlichen Material ausgefüllt werden können. Der Nachteil dieser Zellen liegt darin, daß die Fläche lichtelektrisch schlecht ausgenützt ist und daß das Ritzten, wenn es nicht sehr sorgfältig ausgeführt wird, zu schlecht begrenzten Furchen führt, so daß durch ungleichmäßige Belastungen leicht Durchschläge erfolgen können. Die Folge ist im allgemeinen eine geringe Lebensdauer solcher Zellen.

Die technisch günstigste Lösung stellt die Kammzelle (SCHROETER, MICHELSSEN, CASE, THIRRING) dar (vgl. Abb. 69). Wie im Falle der Plattenkondensatorzelle greifen die Elektroden

kammartig ineinander. Ihre Herstellung kann auf verschiedenem Wege erfolgen. Eine Isolationsplatte (Glas) wird mit einer Wachsschicht bestrichen und der kammartige Raster z.B. mit einer Teilmaschine ein-

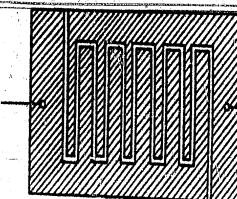


Abb. 68. Geritzte oder gravierte Widerstandszelle.

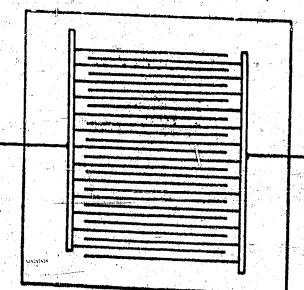


Abb. 69. Kammwiderstandszelle.

§ 3. Zellen mit innerem lichtelektrischen Effekt

177

geritzt. Die Isolationsplatte wird darauf abgezärtzt, so daß nach Entfernen des Wachses der kammartige Raster zum Vorschein kommt. Nach dem Ausfüllen der Rillen mit leitendem Material kann die lichtempfindliche Schicht aufgetragen werden. Ein anderes Verfahren besteht darin, daß der Raster der Isolationsplatte (Keramik) vor dem Brennen eingeprägt wird. Auch hierbei werden die Furchen in gleicher Weise vor dem Aufbringen der lichtempfindlichen Substanz mit leitendem Material ausgefüllt. Bei einem dritten Verfahren wird auf eine bereits mit lichtempfindlichem Material bedeckte Isolationsplatte der Raster mit Hilfe einer Schablone aufgespritzt, aufgedampft oder auf eine andere Art aufgebracht. Als einziger Nachteil der Kammzellen ist zu vermerken, daß die schwachen Rasterstriche einen nicht zu vernachlässigenden Widerstand haben, der sich oft unerwünscht bemerkbar macht.

In letzter Zeit ist man geneigt, in Anbetracht der ungünstigen Rauschverhältnisse, die sich bei langen Berührungsstrecken zwischen lichtempfindlichem Material und Elektroden ergeben, möglichst ohne rasterartige Elektroden auszukommen. Jedoch ist wiederum das Anwendungsgebiet der Zelle ausschlaggebend für ihre Konstruktion. Eine für Relaiszwecke hergestellte Zelle kann nicht optimal arbeiten, wenn sie zum Nachweis geringster Lichtintensitäten verwandt wird und umgekehrt.

Für die modernen Bleisulfidwiderstandszellen (vgl. VI, § 6), gleichgültig ob sie mit oder ohne Kühlung arbeiten, hat sich das Aufdampfen von Gold als Elektroden bewährt. Um eine Beschädigung der dünnen Elektroden zu vermeiden, wird zweckmäßig Zinn auf die Goldelektroden und darüber WOODmetall gespritzt und damit auf diese Weise erreicht, daß die Zuführungsdrähte mit leicht flüssigem Lot ohne Schaden für die Funktion der Zelle befestigt werden können.

Der Raster nach Art der Abb. 68 in verfeinerter Form mit Abständen von weniger als 15μ hat eine besondere Bedeutung für den D.K.-Effekt²¹⁴⁾. Unter dem D.K.-Effekt versteht man eine Änderung der Dielektrizitätskonstanten eines phosphoreszierenden Dielektrikums in einem Kondensator unter dem Einfluß einer Belichtung²¹⁵⁾. Im Rahmen dieses Buches ist die Besprechung des D.K.-Effektes genau so wenig gerechtfertigt wie die Besprechung des BECQUEREL- bzw. des

GÖRLICH, Die lichtelektrischen Zellen

Technische Ausführungsformen

Kristallphotoeffektes (vgl. I, § 2), weil eine technische Anwendung des D.K.-Effektes bisher nicht realisierbar erschien. WESCH mußte beispielsweise seine Messungen mit komplizierten Überlagerungsmethoden gekoppelter Sender durchführen. KRAUTZ kann jedoch nunmehr unter Benutzung des verfeinerten Mäanders direkt mit einer SCHERRINGschen Kapazitätsmeßbrücke arbeiten, wodurch natürlich eine technische Anwendung des D.K.-Effektes nicht mehr aussichtslos erscheint.

c) Herstellerfirmen

Die Tabelle 19 gibt eine Übersicht über die Firmen, die sich nach Kenntnis des Verfassers mit der serienmäßigen Fertigung von Photozellen mit innerem lichtelektrischen Effekt befassen.

Tab. 19. Hersteller von Photozellen mit innerem lichtelektrischen Effekt (Widerstandszenlen)

Acousto-Lite Lab., Los Angeles	Prefler
AEG	Radiovisor Ltd., London
Carl Zeiß	Selenophon AG.
General Electric Comp.	Zeiß-Ikon AG.

**§ 4. Sperrsichtzellen
(Photoelemente)**

a) Stromabnahme

Über den in VII, § 2b und § 3b (Kupferoxydulzellen werden technisch kaum verwandt) angegebenen Aufbau der Sperrsichtzellen hinaus ist für eine technische Ausführung lediglich noch die Stromabnahme vom aufgespritzten Metallring von Bedeutung. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, die Zelle federnd gegen einen Metallring in die Zellenfassung zu pressen. Der Metallring in der Fassung hat den gleichen Durchmesser wie der auf die Zelle aufgespritzte Metallring, so daß die dünne lichtdurchlässige Deckschicht auf der Halbleiterschicht an keiner Stelle verletzt wird. Die Zellenfassung selbst soll auf der Lichteinfallseite einen möglichst flachen Rand besitzen, damit Abschattungen des Lichtes vermieden werden. Die Zuführung zu den Elektroden kann sowohl auf der Rückseite durch Klemmen als auch am Rande der Zellenfassung erfolgen.

§ 4. Sperrsichtzellen

b) Zellengröße und -form

Für die allgemeine Benutzung liefern die Hersteller Rundzellen mit verschiedenem Durchmesser bis zu einem größten Durchmesser der lichtempfindlichen Fläche von ~60 mm. Zellen mit größerem Durchmesser herzustellen, erweist sich als schwierig. Der Widerstand der lichtdurchlässigen Elektrode wird zu groß und kann nur dadurch verbessert werden, daß außer dem Metallring noch weitere metallische Stege aufgespritzt werden, damit die Elektronen kleinere Wegstrecken in der lichtdurchlässigen Deckschicht zurückzulegen haben. Man kann jedoch zu größeren lichtempfindlichen Flächen auch dadurch kommen, daß man mehrere kleinfächige Zellen zu einer großflächigen zusammensetzt. So wurde die bisher größte Zelle von 145 mm ø z.B. aus 7 Zellen mit je 50 mm ø gebildet.

Ihr größtes Anwendungsbereich mit Stückzahlen, die in die Tausende gehen, hat die Selensperrsichtzelle im photographischen Belichtungsmesser gefunden, sei es in Handinstrumenten oder sei es dank der Möglichkeit, der Zelle jede plane Form zu geben, im eingebauten Belichtungsmesser. Um den in einer Kamera zur Verfügung stehenden Platz zweckmäßig auszunutzen, wird häufig die Forderung nach vierseitigen Zellen gestellt. In all den Fällen, in denen die Zelle in Belichtungsmessern benötigt wird, wird sie auswechselbar ohne besondere Fassung verwandt.

c) Lieferfirmen

Die für die Lieferung von Sperrsichtzellen in Frage kommenden Lieferfirmen sind in Tab. 20 zusammengefaßt.

Tab. 20. Lieferfirmen für Sperrsichtzellen

A. Deutsche Firmen:

AEG	Prefler
Electrocell GmbH.	Radiosender AG., Berlin
Dr. Bruno Lange, Berlin	Süddeutsche Apparatefabrik (SAF)

B. Ausländische Firmen:

Burt Scientific Laboratories, Pasadena, Cal.	Emby Products Co., Los Angeles
Clark Controller Co., Cleveland, Ohio	Evans Electroelenium Ltd., Bishop's Stafford, Hertfordshire
Electro Physical Lab. Ltd., London	General Electric Co., Schenectady N.Y.

Tab. 20 (Forts.)

General Scientific Corp., Chicago	Staatl. Opt. Inst. Leningrad
Leeds and Northrup Co., Philadelphia, Pa.	Tungsram, Budapest
Photobell Corp., New York, N. Y.	Western Electric, New York, N. Y.
Photovolt Corp., New York, N. Y.	Westinghouse Electric and Mfg. Co., Bloomfield, N. Y.
RCA Mfg., Co., Camden, N. J.	Weston Electrical Instrument Corp., Newark, N. Y.
Rehtron Corp., Chicago III	
Rhamstine, Detroit, Mich.	

X. Abschnitt

Eigenschaften der lichtelektrischen Zellen

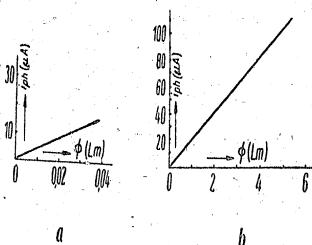
Vom Standpunkt des Verbrauchers ist es zu verstehen, wenn eine Zahl gefordert wird, die etwa als Gütezahl für die technische Anwendung der lichtelektrischen Zelle zugrunde gelegt werden kann. Abgesehen davon, daß es nicht möglich ist, die Abweichung von der Proportionalität zwischen einfallender Lichtintensität und Photostrom, die Abhängigkeit des Photostromes von der Vorspannung, die Frequenzabhängigkeit, die Größe des Rauschens, die Konstanz der Empfindlichkeit, die Temperaturabhängigkeit des Photostromes bzw. der Photospannung, die Lebensdauer und die Größe der lichtempfindlichen Fläche in eine Gütezahl zu zwingen, hat eine solche Zahl wenig Wert, weil jedes Anwendungsgebiet das Hauptgewicht auf eine andere Zelleneigenschaft legt. Sinn hat es lediglich, eine Gütezahl für Zellen zu definieren, die jeweils einem gleichen Verwendungszweck zugeführt werden. Ein Bild über die Verwendbarkeit aller lichtelektrischen Zellen gewinnt man also nur dann, wenn man ihre Eigenschaften im einzelnen betrachtet.

§ 1. Kennlinien

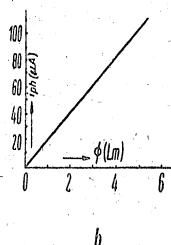
a) Verhalten von Vakuum- und Gaszellen in bezug auf die Proportionalität

Die Gleichung (15) $i_{ph} = C\Phi$ bzw. $i_{ph} = C'E$, gültig für Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt, fordert strenge Proportionalität zwischen einfallender Lichtintensität und ausgelöstem Elektronenstrom unter der Voraussetzung, daß monochromatisches Licht eingeschossen wird. C wird dabei physikalisch in Coul/cal für alle Wellenlängen angegeben (vgl. z. B. Abb. 23 und 29), praktisch jedoch in mA/Watt bzw. A/Watt und im sichtbaren Spektralbereich, wie in II, § 3a und II, § 1e und f bereits gesagt, in $\mu\text{A}/\text{lm}$. Für Vakuumzellen (IX, § 1e) dürfte in hinreichend begrenzten Gebieten, insbesondere für

kleine einfallende Intensitäten, die Proportionalität gewährleistet sein. Über größere Bereiche einfallender Intensität hinweg müssen besondere Vorsichtsmaßregeln Beachtung finden. Festgehalten werden muß, daß der äußere lichtelektrische Effekt an sich das Proportionalitätsgesetz streng befolgt, daß jedoch zu dessen Erfüllung eine Zellenkonstruktion angewandt werden muß, die die notwendigen Voraussetzungen berücksichtigt. Dabei ist zunächst Vorbedingung, daß im Sättigungsgebiet, d. h. mit Spannungen, bei denen alle ausgelösten Elektronen tatsächlich die Anode erreichen, gearbeitet und daß mono-



a



b

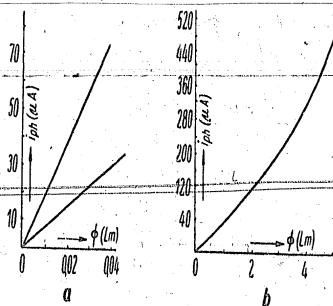
Abb. 70. Abhängigkeit des Photostromes vom auffallenden Lichtstrom (serienmäßige Cs_2O -Vakuumzellen).

chromatisches Licht verwendet wird. Die Abb. 70a und b geben Beispiele für die Bereiche von 0 bis 0,04 Lumen und von 0–5 Lumen (Außenwiderstand $0,5 \cdot 10^6 \Omega$), die zeigen, daß eine weitgehende Proportionalität auch im weißen Licht praktisch erreichbar ist. Die Vor-

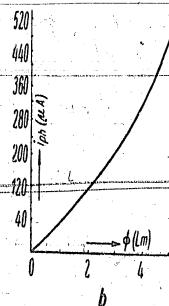
aussetzungen, die bei der Zellenkonstruktion bzw. Herstellung berücksichtigt sein müssen, damit die Proportionalität erfüllt ist, sind a) gutes Vakuum, b) Vermeidung von Wandladungen, c) Vermeidung von Kriechströmen sowohl innerhalb als auch außerhalb der Zelle, d) Vermeidung von Feldverzerrungen und e) Vermeidung hoher Querwiderstände in der lichtempfindlichen Schicht. Berücksichtigt man diese fünf Punkte sowie die beiden oben genannten Vorbedingungen, so gilt das Proportionalitätsgesetz streng²¹⁶.

Die Einhaltung des Punktes a, nämlich gutes Vakuum, läßt erwarten, daß beträchtliche Abweichungen vom Proportionalitätsgesetz bei gasgefüllten Zellen auftreten. Tatsächlich zeigen gasgefüllte Zellen Abweichungen vom Proportionalitätsgesetz insbesondere dann, wenn sie mit einer Spannung betrieben werden, die nahe der Glimmspannung (vgl. Abb. 80) liegt. In Abb. 71a und b sind wieder zwei Beispiele mitgeteilt, die sich auf die gleichen Gebiete wie in Abb. 70a und b beziehen²¹⁷ und die Abweichungen von der Proportionalität erkennen lassen.

Ob im Gebiet höchster Lichtströme für Vakuumzellen die Proportionalität noch erfüllt bleibt, interessiert im allgemeinen für technische



a



b

Abb. 71. Abhängigkeit des Photostromes vom auffallenden Lichtstrom (serienmäßige Cs_2O -Zellen, gasgefüllt).

Belange nicht. Es läßt sich fast immer mit Abschwächungsmitteln arbeiten, so daß man in das Gebiet mittlerer einfallender Lichtströme kommt, für das die Proportionalität erreicht werden kann. Für höchste Lichtströme wird man einen starken Einfluß der durch den Elektronenstrom hervorgerufenen Raumladungen annehmen müssen. Tatsächlich zeigen Cäsiumpoxydvakuumzellen (vgl. Abb. 72) bei einfallenden Lichtströmen zwischen 100 und 1000 Lumen keine Proportionalität mehr²¹⁸). Je höher die Anodenspannung gewählt wird, um so mehr nähern sich die Kurven der Proportionalitätsgeraden, weil bei höheren einfallenden Lichtströmen immer größere Feldstärken angreifen müssen,

um alle ausgelösten Elektronen von der Kathode wegzuziehen. Niedrige Spannungen bewirken daher bei hohen Lichtströmen starke Abweichungen von der Proportionalität.

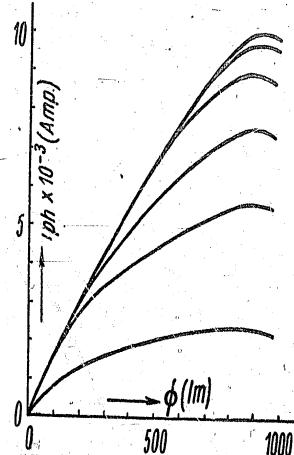


Abb. 72. Abhängigkeit des Photostromes von der auffallenden Lichtintensität (serienmäßige Cs_2O -Vakuumzellen).

b) Strom-Spannungskennlinien der Vakuumzellen

Man wird nach der Erkenntnis, daß bei seriennäßigen Zellen die Proportionalität zwischen Photostrom und einfallender Lichtintensität nicht immer gewahrt sein muß, die Abhängigkeit des Photostromes von der Lichtintensität nachprüfen und, falls notwendig, die Abweichungen von der Proportionalität entsprechend in Rechnung setzen. Eine vollständige Übersicht des Verhaltens einer Zelle ergibt

sich jedoch erst, wenn dazu auch die Abhängigkeit des Photostromes von der Zellenvorspannung (Saugspannung) bekannt ist, wenn also das Kennlinienfeld

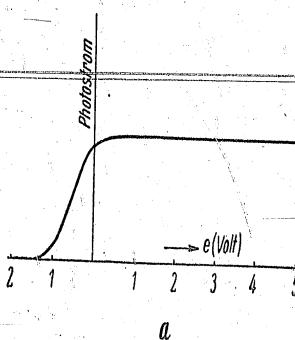
$$i_{ph} = f(\Phi, e)$$

gemessen ist.

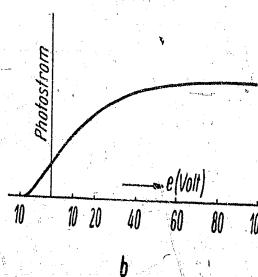
Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei den Vakuumzellen. Für konstantes einfallendes, monochromatisches Licht ergeben sich Strom-Spannungscharakteristiken der Form, wie sie in Abb. 73 gezeigt sind, die Kurve a für eine Zelle mit zentraler Kathode und die Kurve b für eine Zelle mit zentraler Anode. Die Charakteristik einer Zelle mit zentraler Kathode zeigt Sättigung für alle positiven Saugspannungen.

Abb. 73. Strom-Spannungscharakteristik für eine Zelle a) mit zentraler Kathode u. b) mit zentraler Anode.

Jedes ausgelöste Elektron erreicht die Anode. Nach negativen Spannungen wird ein steiler Abfall des Elektronenstromes auf Null im Spannungsbereich bis zu ~ 2 V gefunden. Die Photoelektronen besitzen also eine Geschwindigkeitsverteilung (II, § 3c und IX, § 1d), denn es existieren Elektronen, die vermöge ihrer Eigengeschwindigkeit gegen ein Bremsfeld bis zu ~ 2 V anzulaufen imstande sind. Trägt man die Anzahl der Elektronen, die im Anlaufstromgebiet jeweils einem



a



b

§1. Kennlinien

Spannungsintervall $e + \Delta e$ entsprechen, über dem Mittelwert von $e + \Delta e$ auf, so resultiert daraus die Energieverteilungskurve für die Wellenlänge λ des einfallenden monochromatischen Lichtes. Man erhält also durch Differentiation der Anlaufstromkurve die Geschwindigkeits- bzw. Energieverteilungskurve. Auf gleiche Weise kann man auch die Geschwindigkeits- bzw. Energieverteilungskurve für Sekundärelektronen gewinnen. Für kürzere eingestrahlte Wellen, also für zunehmende Frequenz, sagt die Gleichung (21) aus, daß das maximale Potential dabei ansteigt, daß also Elektronen mit größerer Geschwindigkeit ausgelöst werden. Dieser Umstand bedingt seinerseits, daß sich die Energieverteilungskurve und damit das Anlaufstromgebiet verbreitert.

Für Zellen mit zentraler Anode erhält man die Sättigung, wie Abb. 73 b zeigt, erst bei positiver Anodenspannung in der Gegend von etwa 40–50 V. Entsprechend der Zellenkonstruktion kann für einen zwischen den beiden Extremfällen der zentralen Kathode und der zentralen Anode liegenden Fall die Sättigungsspannung zwischen 0 und ~ 60 V erzielt werden.

Der reine Sättigungscharakter wird dann nicht mehr erreicht, wenn Spuren von Restgasen in der Zelle vorhanden sind oder während des Betriebes durch Überlastung oder auf andere Art Gasausbrüche erfolgen. Aber auch durch andere Umstände kann es möglich sein, daß für gewisse eingestrahlte Wellenlängen der Sättigungscharakter verlorenginge. Wie in II, § 2d angedeutet ist, wird die Austrittsarbeit durch ein äußeres elektrisches Feld herabgesetzt. Die Existenz dieses SCHOTTKY-Effektes ist für die Glühemission nachgewiesen worden und muß sich auch beim äußeren lichtelektrischen Effekt bemerkbar machen. In der Tat zeigt sich der „äußere Feldeffekt“ in der Neigung des sonst horizontal verlaufenden Teiles der Strom-Spannungscharakteristik, die abhängig von der Wellenlänge des die Elektronen auslösenden Lichtes (vgl. Abb. 74) ist²¹⁹, wenn die Kathodenoberfläche, wie es insbesondere für zusammengesetzte Kathoden der Fall ist, Unebenheiten aufweist. Durch die Unebenheiten werden hohe Potentialgradienten an der Oberfläche hervorgerufen, so daß ein Eingriff des verhältnismäßig kleinen äußeren Feldes in die Oberfläche zustande kommt. Die Neigung gegen die Horizontale nimmt mit zunehmender

Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes zu. Man kann den äußeren Feldeffekt auch unter Benutzung hoher elektrischer Felder nachweisen²²⁰). Mit der Vergrößerung des Gradienten ist eine Parallelverschiebung der spektralen Verteilung nach längeren Wellen festzustellen.

Neben dem äußeren Feldeffekt wird noch ein zweiter, der „innere Feldeffekt“, beobachtet²²⁰). Der innere Feldeffekt läßt sich durch die Wirkung einer Doppelschicht an der Oberfläche der Kathode erklären, die diese elektropositiver erscheinen läßt. Beide Feldeffekte, sowohl der äußere als auch der innere, sind also an bestimmte Oberflächenverhältnisse gebunden. Die Einwirkung erfolgt auf Elektronen, die bereits vom Licht Energie erhalten, aber die Kathode noch nicht verlassen haben. Die modernen Cäsiumoxydkathoden des Typs $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}, \text{Cs}, \text{Ag}-\text{Cs}$ (vgl. IV, § 4) liefern bei Belichtung auch in

Abb. 74. Einfluß des „äußeren Feldeffektes“ auf die Strom-Spannungskennlinie einer Zelle mit zentraler Kathode.

tiefen Kathodenlagen Elektronen, so daß ein großer Prozentsatz Elektronen geringerer Geschwindigkeit zur Verfügung steht. Diese Elektronen können ohne äußeres beschleunigendes Feld die Kathode nicht verlassen. Erst durch den äußeren Feldeffekt werden sie der Messung zugänglich²²¹). Der Tatbestand läßt sich nicht nur aus den Strom-Spannungskennlinien schließen, sondern auch daraus, daß bis zu beschleunigenden Spannungen von 0 bis 2 V

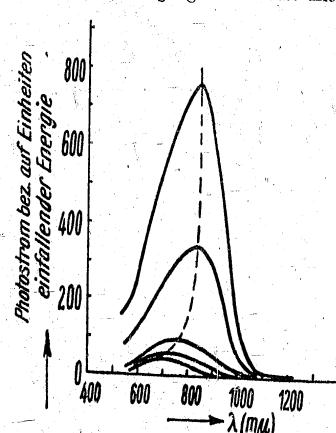


Abb. 75. Einfluß des äußeren Feldes auf die spektrale Verteilung einer $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}, \text{Cs}, \text{Ag}-\text{Cs}$ -Kathode.

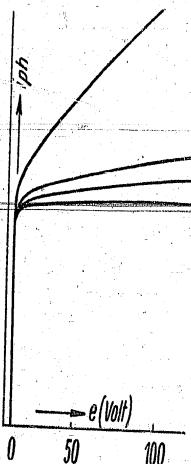


Abb. 74. Einfluß des „äußeren Feldeffektes“ auf die Strom-Spannungskennlinie einer Zelle mit zentraler Kathode.

das langwellige Maximum von kürzeren nach längeren Wellen wandert (vgl. Abb. 75).

An Abnormitäten, die bei der Messung einer Strom-Spannungscharakteristik auftreten können, sei noch die Strom-Spannungskennlinie mit Unstetigkeitsstellen erwähnt. Mißt man die Charakteristik von niederen nach höheren Spannungen durch, so springt bei einer Spannung e_{sI} (etwa 100 V) der

Photostrom plötzlich auf einen höheren Wert (vgl. Abb. 76). Rückwärts gemessen liegt die Sprungspannung e_{sII} niedriger (etwa bei 50 V). Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß Zellenteile, wie das Zellenfenster, die durch einen hohen Widerstand mit der Kathode verbunden sind, bedingt durch das Her-

stellungsverfahren dünne Schichten tragen, die Sekundärelektronen abzugeben vermögen²²²) und dadurch als dritte Elektrode wirken.

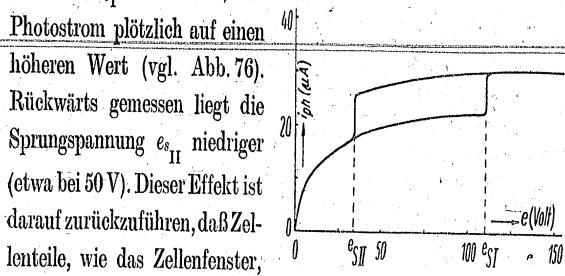


Abb. 76. Strom-Spannungskennlinie einer Cäsiumoxydzelle mit Unstetigkeitsstellen. Herstellungsverfahren dünne Schichten tragen, die Sekundärelektronen abzugeben vermögen²²²) und dadurch als dritte Elektrode wirken.

c) Strom-Spannungscharakteristiken der Vakuumzellen mit Wechselspannung

In manchen Fällen muß der Photozelle eine Wechselspannung zugeführt werden. Man denke hierbei insbesondere an die Modulierung

einer Trägerfrequenz durch Licht oder an die Anwendung der Photozelle als Gleichrichter für hochfrequente Spannungen. Offenbar muß sich oberhalb einer bestimmten Frequenz, und zwar dann, wenn die Laufzeiten der Elektronen mit der Periodendauer vergleichbar wer-

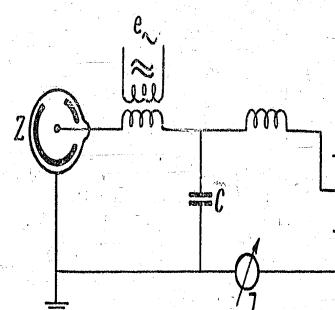


Abb. 77. Schaltung einer Photozelle zur Messung der Strom-Spannungscharakteristik mit Wechselspannung und überlagerter Gleichspannung.

den, eine Grenze der Verwendbarkeit der Photozelle für Gleichrichterzwecke ergeben. Die in Abb. 77 angegebene Schaltung²²³⁾ (man vgl. hierzu die Schaltungen für den Pendelvervielfacher und für den Ein-kathodenvervielfacher, IX, § 2h) kann zur Messung der Strom-Spannungscharakteristik einer Photozelle mit Wechselspannung und, wenn notwendig, mit überlagerter Gleichspannung Verwendung finden. Die Charakteristiken moderner zusammengesetzter Kathoden (Cäsiumoxyd- bzw. Legierungskathoden, IV, § 4), gemessen mit Wechselspannung verschiedener Frequenzen, weisen eine Reihe von Besonderheiten auf, die sich ähnlich wie die Verhältnisse an den Pendelvervielfachern deuten lassen. In der Abb. 78 ist zunächst die gewöhnliche

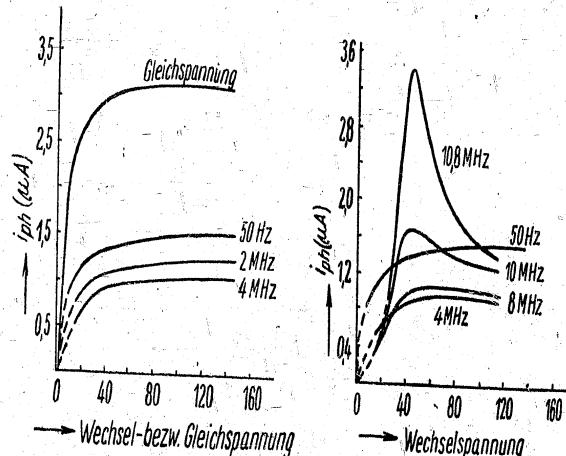


Abb. 78. Strom-Spannungscharakteristik einer Cs_2O -Zelle gemessen mit Gleichspannung (a) und mit Wechselspannung verschiedener Frequenz (b).

Charakteristik einer Cäsiumoxydzelle mit zentraler Anode, mit Gleichspannung gemessen, wiedergegeben. Bis zu einer Frequenz von etwa 10^6 Hz verlaufen die Kurven ebenso wie die Kurve für 50 Hz. Für Frequenzen bis zu 4 MHz jedoch sinkt der Strom ab, um für noch höhere Frequenzen wieder anzusteigen. Oberhalb 10 MHz (vgl. Abb. 79) tritt für ganz bestimmte Wechselspannungsamplituden Pendelvervielfachung auf, wie durch die auftretenden Maxima bewiesen wird.

Die Anode wirkt wie im Falle des Pendelvervielfachers als sekundär-emissionsfähige zweite Elektrode. Es ist in Zellen mit Cs-Kathoden immer damit zu rechnen, daß Spuren von Cs oberflächlich auch auf die Anode niedergeschlagen werden, so daß die Anode als sekundär-emissionsfähig angesehen werden muß. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich, wenn der Wechselspannung eine Gleichspannung überlagert wird. Für Frequenzen > 12 MHz wird in allen Fällen ein Strom von einigen mA auch ohne Belichtung beobachtet (Dunkelstrom + kapazitive Ströme). Offenbar wird der Dunkelstrom durch den Vervielfachungsprozeß mindestens auf das 10^6 - bis 10^7 fache verstärkt. Die angegebenen Werte gelten für eine Kugelzelle von 10 cm Ø. Für Zellen mit kleineren Abmessungen treten die Resonanzeffekte, wie leicht einzusehen ist, bei höheren Frequenzen auf. Für die Anwendung ergibt sich hieraus, daß nur solche Zellen Verwendung finden dürfen, bei denen der Abstand der Elektroden so klein ist, daß die Laufzeit der Elektronen wenigstens eine Größenordnung kleiner als die Periode der verwendeten Wechselspannung ist.

d) Strom-Spannungscharakteristiken der gasgefüllten Zellen

Im Gegensatz zur Strom-Spannungscharakteristik einer Vakuumzelle zeigt die einer gasgefüllten Zelle (IX, § 1c) keinen Sättigungscharakter (Abb. 80). Bei niedrigen Saugspannungen verläuft die Charakteristik ähnlich wie bei einer Vakuumzelle, sobald jedoch die angelegte Saugspannung so hoch wird, daß die Elektronen Geschwindigkeiten erhalten, die hinreichend groß sind, um das Füllgas zu ionisieren, tritt eine Verstärkung des Photostromes ein, die sich im Ansteigen der Charakteristik auswirkt. Im Gebiete des Vorglimmlichtes (e_v) arbeitet die Zelle instabil, bis schließlich nach dem Erreichen der Glimmspannung e_n eine selbständige Entladung einsetzt. Nach dem Einsetzen der Glimmentladung ist der Strom durch Licht nicht mehr steuerbar. Beispiele von Charakteristiken serienmäßiger Zellen sind in Abb. 81 zusammengestellt. Der Nachteil der Verstärkung durch Stoßionisation in Photozellen mit hochempfindlichen, zusammengesetzten Kathoden besteht darin, daß die durch Stoß entstandenen Restatome auf die Kathode fliegen und diese dadurch zerstören können. Um über den für eine Zelle günstigsten Gasdruck Aussagen

treffen zu können, sind in Abb. 82 die Charakteristiken für verschiedene Gasdrücke wiedergegeben. Aus dieser Schar der Charakteristiken resultiert die Kurve Abb. 83, die die Beziehung zwischen Empfindlichkeit und Gasdruck darstellt.

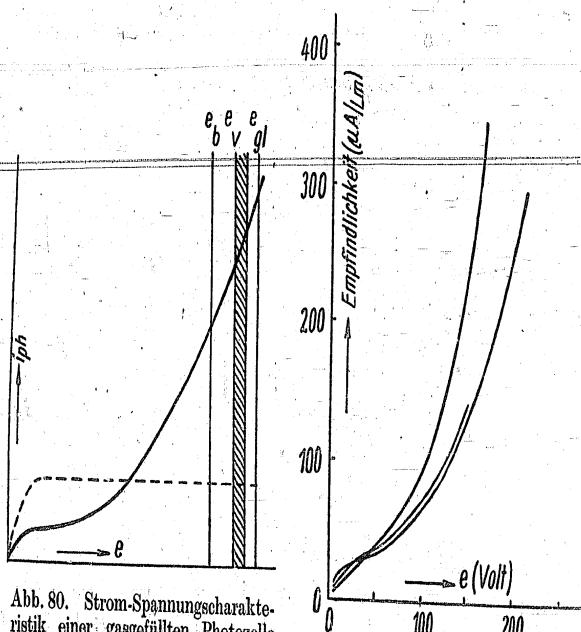


Abb. 80. Strom-Spannungscharakteristik einer gasgefüllten Photozelle (vergleichsweise ist die Charakteristik einer Vakuumzelle gestrichelt eingesetzt).

Abb. 81. Strom-Spannungscharakteristiken serienmäßiger Zellen mit zusammengesetzten Kathoden.

keit und Gasdruck der Zelle erkennen läßt. Es ergibt sich ein ausgeprägtes Maximum der Empfindlichkeit bei einem Druck, im Beispiel von 0,2 mm Hg, welches den Namen „STOLETOWSches Maximum“ trägt. Andere Zellentypen können das Maximum auch bei höherem Druck (bis $\sim 0,8$ mm Hg) aufweisen. Die Lage des STOLETOWSchen Maximums ist im wesentlichen durch die freie Weglänge der Elektronen zwischen zwei Zusammenstößen gegeben. Je höher der Druck wird, um so kleiner die freie Weglänge. Es wird demnach der Fall eintreten müssen, daß ein Elektron, ehe es auf das nächste Füllgasatom stößt, nicht mehr genügend Energie aus dem Feld entnehmen kann, um das gestoßene Atom zu ionisieren. Der Photostrom wird abfallen.

Um das instabile Arbeiten gasgefüllter Photozellen zu vermeiden, wird man möglichst eine Spannung, die maximale Betriebsspannung (Abb. 80), nicht überschreiten.

Zweckmäßig liegt die maximale Betriebsspannung etwa zwischen 25 bis 30 % unter der Glimmspannung, die im Dunkeln gemessen ist, denn bei Belichtung der Zelle sinkt die Glimmspannung noch um ein beträchtliches ab (Beispiel in Abb. 84). Schließlich ist die Kenntnis der Abhängigkeit der Glimmspannung vom Gasdruck in der Zelle notwendig. Die Art der sich ergebenden Kurven, die von der Elektrodenanordnung beeinflußt werden, zeigt die Abb. 85. Für Drücke unter 0,2 mm Hg steigt die Glimmspannung steil an.

Während im Sättigungsgebiet die Vakuumzelle einen spannungsabhängigen Widerstand darstellt, der beispielsweise zur Spannungs-

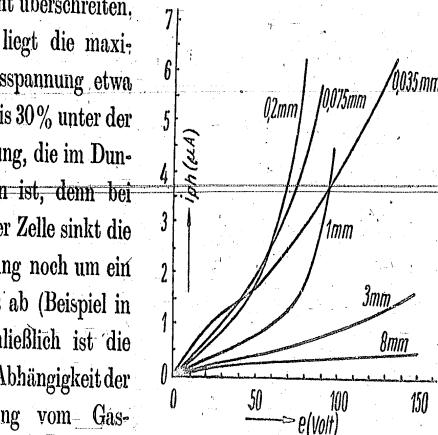


Abb. 82. Charakteristiken bei verschiedenem Gasdruck.

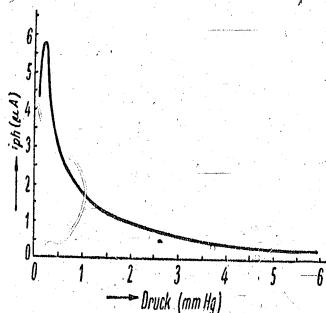


Abb. 83. STOLETOWSches Maximum.

stabilisierung vorteilhaft Verwendung finden kann, verläuft der Widerstand in Abhängigkeit von der angelegten Spannung für gasgefüllte Zellen nach Kurve b in Abb. 86. Der besseren Übersicht halber ist noch die Charakteristik einer serienmäßigen Cäsiumoxydzelle einge-

zeichnet (Kurve a). Die Widerstände liegen in der Größenordnung 10^6 Ohm.

In bestimmten Fällen muß bei der Verwendung von gasgefüllten Zellen beachtet werden, daß sich der Elektronenstrom durch die Ionisationsvorgänge in gasgefüllten Zellen aus zwei Teilen zusammensetzt. Die lichtelektrisch ausgelösten Elektronen gemeinsam mit den durch den Zusammenprall mit Gasmolekülen erzeugten Elektronen erreichen

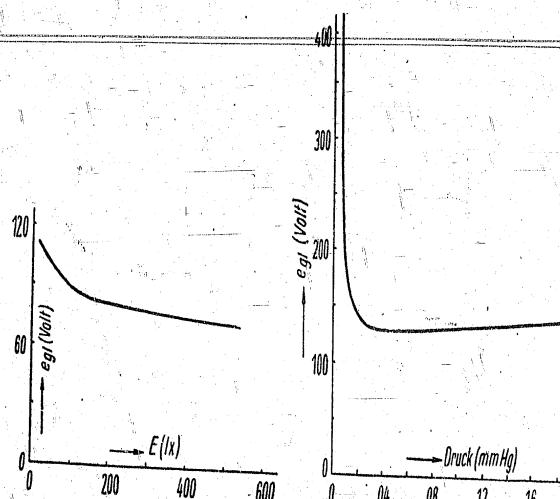


Abb. 84. Absinken der Glimmspannung e_{gli} bei Belichtung der Zelle.

Abb. 85. Abhängigkeit der Glimmspannung vom Gasdruck.

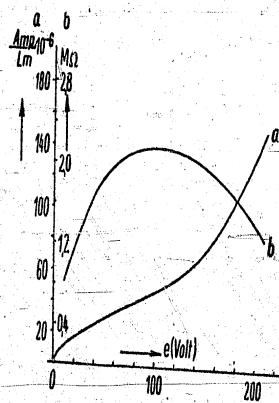


Abb. 86. Innerer Widerstand einer gasgefüllten Zelle in Abhängigkeit von der Saugspannung (Cs_2O -Zelle).

praktisch gleichzeitig ohne Verzögerung die Anode und bilden den einen Teil des Stromes. Die langsamsten positiven Gasionen stoßen auf die Kathode und erzeugen ihrerseits Elektronen, die den anderen Teil des Stromes ausmachen und mit einer Verzögerung zur Anode gelangen. Der Gesamtstrom i_{Ges} kann durch Integration der einzelnen Strombeiträge erhalten werden aus²²⁴⁾

$$i_{Ges} = i_0 n [1 - \eta (\cos \omega t - \varphi)], \quad (75')$$

wobei gilt

$$\eta = \sqrt{\frac{p^2 \omega^2 + q^2}{\omega^2 + q^2}}, \quad (75'')$$

$$p = \frac{(\gamma + Z)n - Z + 1}{(\gamma n + 1)n} \quad (75''')$$

und

$$q = -\frac{1}{t_i} \ln \frac{n-1}{n+\frac{1}{\gamma}} \quad (75^{IV})$$

In den Gleichungen (75') bis (75^{IV}) bedeuten

ω die Kreisfrequenz der Lichtmodulation,

φ die Phasenverschiebung des zweiten Stromanteils gegen den ersten,

n den Verstärkungsfaktor der gasgefüllten Zelle einer entsprechenden Vakuumzelle gegenüber,

η den Wirkungsgrad der Verstärkung, der auch als Maß für die Verkleinerung der Modulationstiefe angesehen werden kann,

γ die Zahl der Elektronen, die je aufprallendes Ion aus der Kathode auszutreten vermögen,

t_i die mittlere Laufzeit der Ionen und

Z eine Größe, die sich aus der räumlichen Anordnung der Elektroden ergibt.

e) Verhalten der Vervielfacher in bezug auf die Proportionalität

Ebenso wie für die Photozellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt ist für die lichtelektrischen Vervielfacher die Frage nach der Proportionalität zwischen einfallender Lichtintensität und Vervielfacherausgangsstrom berechtigt. Proportionalität zwischen Vervielfacherausgangsstrom und Lichtintensität kann natürlich von vornherein dann nicht erwartet werden, wenn der auf die erste Sekundäremissionskathode fallende lichtelektrische Primärstrom der einfallenden Licht-

Görlich, Die lichtelektrischen Zellen

intensität nicht proportional ist. Zunächst muß also darauf geachtet werden, daß im lichtelektrischen Teil des Vervielfachers alle Bedingungen, die die Proportionalität gewöhnlicher Photozellen sicherstellen, auch hier erfüllt sind. Die hohen Ströme, die vor allem zwischen den letzten Vervielfacherstufen fließen, lassen nun, selbst unter der Voraussetzung, daß tatsächlich der auf die erste Sekundärkathode fallende Primärstrom der Lichtintensität proportional ist, nicht ohne besondere Prüfung die Proportionalität des Gesamtvervielfachers voraussetzen. Es könnten durch Raumladungseffekte Abweichungen auftreten, z. B. dadurch, daß die fokussierende Wirkung zerstört wird. Zwar wird man geneigt sein, im Sättigungsgebiet zu arbeiten; für hohe Verstärkung bei hohen einfallenden Lichtintensitäten ist jedoch nicht von der Hand zu weisen, daß die Sättigungsspannungen der letzten Stufen sowohl im Hinblick auf den Durchgriff als auch im Hinblick auf die Isolationsfrage unangenehm hoch liegen müssen. In der Tat sind oft Vervielfacher mit beträchtlichen Abweichungen von der Proportionalität beschrieben worden. Daß jedoch in großen Be-

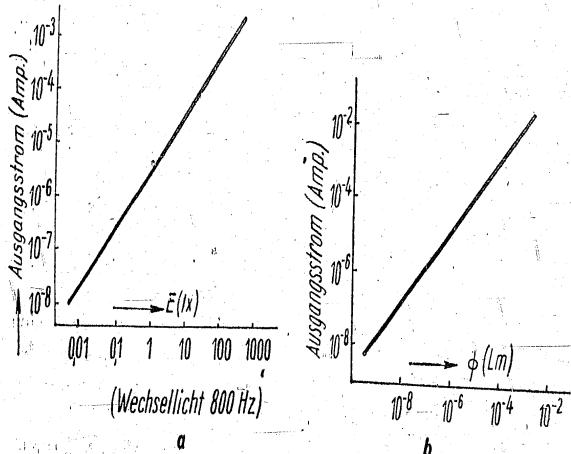


Abb. 87. Abhängigkeit des Vervielfacherausgangsstromes von der einfallenden Lichtintensität.

reichen einfallender Intensitäten auch Vervielfacher mit hinreichender Proportionalität im weißen Licht existieren, beweist die Abb. 87a und b²²⁵). In Abb. 87a erfolgt die Messung bis zu Ausgangströmen von 10^{-3} A, in Abb. 87 b sogar bis 10^{-2} A.

f) Verhalten der Widerstandszellen

Für Photozellen mit innerem lichtelektrischen Effekt (Widerstandszellen) wird man entsprechend den Gesetzmäßigkeiten, die in den Abschnitten II, § 4 und VI, § 3 erwähnt sind, lediglich für den reinen Primärstrom Proportionalität zwischen Photostrom und einfallender Lichtintensität erwarten dürfen, gleichgültig, ob die angelegte Span-

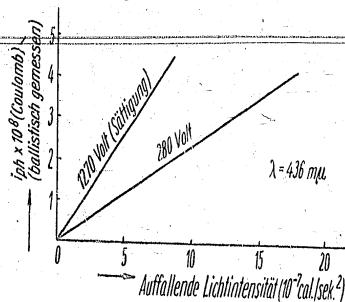


Abb. 88. Abhängigkeit des Primärstromes von der eingeschalteten Energie an Zinkblende.

mung zur Sättigung hinreicht oder nicht. In den Abb. 88 und 89 ist das bekannte Beispiel der Zinkblende (GUDDEN und POHL) angeführt. Abb. 88 zeigt, daß sowohl für Sättigungsspannungen als auch für eine Spannung unterhalb der Sättigung Proportionalität vorhanden ist, wenn Licht der Wellenlänge $436 \text{ m}\mu$ eingestrahlt wird, Abb. 89 hingegen, daß der Primärstrom zunächst linear mit der Feldstärke ansteigt und daß schließlich bei hohen Feldstärken die Sättigung unabhängig von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes eintritt. Ähnlich

liegen die Verhältnisse für rotes isolierendes Selen, auch hier Proportionalität und lineare Abhängigkeit von der Spannung für niedrige Spannungswerte (vgl. Abb. 90 und 91). Beide als Beispiel gewählte Substanzen, die Zinkblende und das rote Selen, sind als Material für technische Zellen unbrauchbar wegen der sehr geringen Primär- und

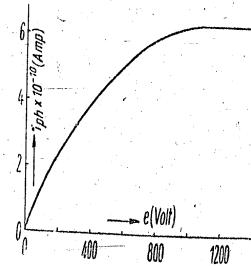


Abb. 89. Strom-Spannungskurve für Zinkblende.

Sekundärströme. Die Zellfertigung benutzt, wie in VI, § 3 und § 5 auseinandergesetzt ist, die graue und grauschwarze kristalline Modifikation des Selens und vor allem das Thalliumsulfid, beides Substanzen mit höchsten Sekundärströmen im formierten Zustand, für die daher Proportionalität zwischen Gesamtstrom und einfallender Lichtintensität von vornherein nicht auftreten kann.

Als Beispiel ist in Abb. 92 die Abhängigkeit des Photostromes (Primär + Sekundärstrom) von der einfallenden Lichtintensität einer handelsüblichen Selenzelle gewählt [vgl. Gleichung (66)], welches erkennen läßt, daß a) die Proportionalität nicht erfüllt ist und daß b) ohne Belichtung ein beträchtlicher Dunkelstrom fließt. Es empfiehlt sich, die einfallende Intensität in Lux anzugeben, weil Zellen mit innerem lichtelektrischen Effekt (Widerstandszenen) auf punktförmig konzentriertes Licht anders ansprechen als auf solches, das über die ganze Zellenfläche gleichmäßig verteilt ist. Der

ohne Belichtung fließende Dunkelstrom entspricht einem Dunkelwiderstand R_D bzw. einer Dunkelleitfähigkeit $1/R_D$. Bei Belichtung mit der Beleuchtungsstärke E zeigt die Zelle den Widerstand R_E bzw. die Leitfähigkeit $1/R_E$. Beide Widerstände, R_D und R_E , sind in Abb. 93 in Abhängigkeit von der angelegten Spannung wiedergegeben. Für den größten Teil aller technischen Widerstandszenen

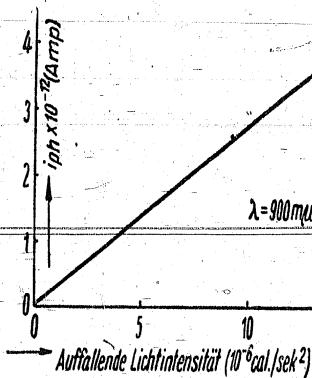


Abb. 90. Abhängigkeit des Primärstromes am roten isolierenden Se.

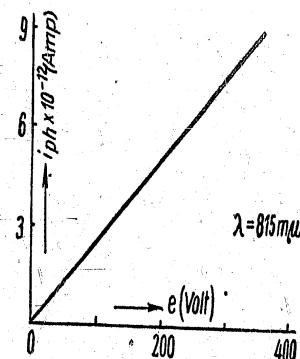


Abb. 91. Strom-Spannungskurve für rotes isolierendes Se.

ergibt sich nach BARNARD eine lineare Abhängigkeit zwischen R_D und $\log e$, wenn e die angelegte Spannung bedeutet.

Die Definition der Empfindlichkeit einer Widerstands zelle stößt wegen der Nichtproportionalität auf Schwierigkeiten. Man ist daher

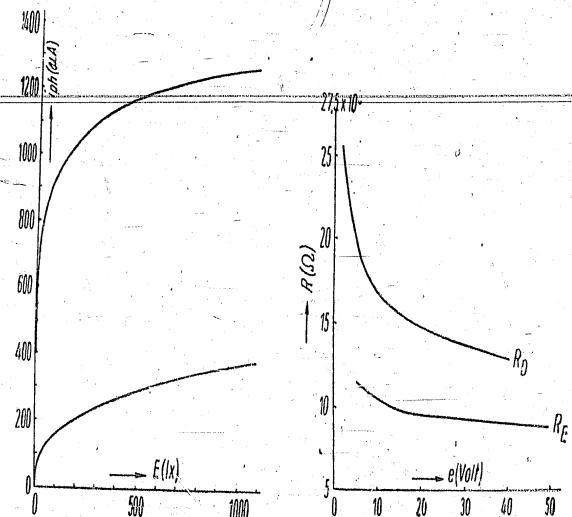


Abb. 92. Abhängigkeit des Photostromes von der einfallenden Intensität für zwei Typen technischer Selenwiderstandszenen.

Abb. 93. Abhängigkeit des Dunkelwiderstandes R_D und des Widerstandes bei Belichtung R_E von der angelegten Spannung für eine technische Selenzelle (110 lx).

gezwungen, die Empfindlichkeit für eine bestimmte Beleuchtungsstärke, etwa 100 Lux, festzulegen, indem man die Differenz des Dunkelstromes und des Gesamtstromes bei 100 Lux bildet und den Quotienten aus Differenzstrom und Dunkelstrom als Maß für die Empfindlichkeit einer Widerstands zelle einführt. Zellen der gleichen Type lassen sich auf diese Weise gut untereinander vergleichen.

Zur Charakterisierung der Zellen verschiedener Typen untereinander wählt man am zweckmäßigsten eine Darstellung, wie sie in Abb. 94 a und b gezeigt wird. Für verschiedene technische Widerstandszenen²²⁶), Selen- und Thalliumsulfidzellen, ist die Differenz der Leitfähigkeiten im Hellen und im Dunklen, $L = 1/R_E - 1/R_D$, über die einfallende Intensität E in Lux aufgetragen. Die in VI, § 3 durch

Gleichung (66) gegebene Beziehung schreibt sich dann

$$\frac{1}{R_E} - \frac{1}{R_D} = C'E^\alpha \quad (\text{nach BARNARD, } C' \text{ und } \alpha \text{ Zellenkonstanten}) \quad (76a)$$

und würde fordern, daß in einem zweifachlogarithmischen Koordi-

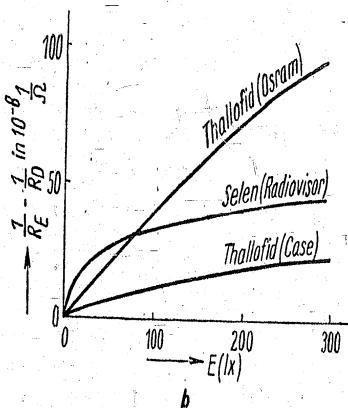
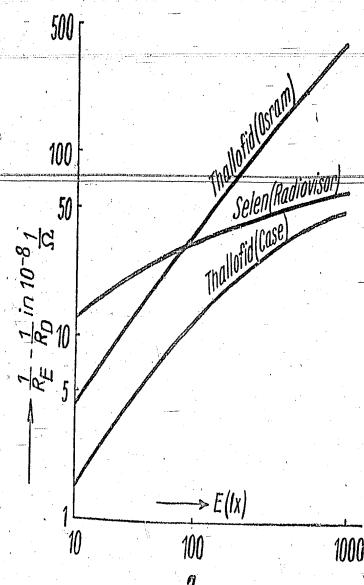


Abb. 94. Abhängigkeit der Differenz der Leitfähigkeiten im Hellen und im Dunkeln von der Belichtung.

natensystem [vgl. (94a)] für eine konstante Spannung gerade Linien entstehen. Man sieht bei Betrachtung der Abb. 94, daß die Gleichung (76a) in genügend eng begrenzten Belichtungsintervallen erfüllt ist, und

zwar besser für die Thalliumsulfid- als für die Selenzelle. Die Selenzellen zeigen dagegen für kleine einfallende Intensitäten sehr starke Änderungen der Leitfähigkeit und sind daher in diesem Bereich den Thalliumsulfidzellen überlegen, für höhere einfallende Intensitäten kehrt sich jedoch der Sachverhalt um. Besonders deutlich tritt die Sachlage zutage, wenn durch graphische Differenzierung der Kurven aus Abb. 94 die Abhängigkeit dL/dE von der Beleuchtungsstärke E , also die Empfindlichkeitskurve, gewonnen wird. In Abb. 95 ist jeweils $dL/dE = f(E)$ für die gleichen Widerstandszenellen wie in Abb. 94

eingetragen worden. Die Kurven in den Abb. 94 und 95 können als charakteristische Beispiele für alle Selen- und Thalliumsulfidwiderstandszenellen angesehen werden.

In seltenen Fällen wird man bei der technischen Verwendung die Widerstandszenellen mit Wechselspannung, am wenigsten mit Wechselspannung hoher Frequenz, betreiben (für die Forschung können jedoch auf diese Weise wertvolle Aufschlüsse über das Wesen der Leitfähigkeit und der lichtelektrischen Ströme gewonnen werden). Man hat dabei zu beachten, daß mit veränderter Frequenz des Wechselfeldes, aber bei gleicher Feldstärke, Änderungen des lichtelektrischen Stromes auftreten können. Beispielsweise zeigte eine hochohmige Cu_2O -Widerstandszele (Leitfähigkeit $10^{-5} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) mit wachsender Frequenz zwischen 50 KHz und 10 MHz ein Absinken des lichtelektrischen Stromes um ein Fünftel seines ursprünglichen Betrages²²⁷.

g) Verhalten der Sperrsichtzellen

Ein Charakteristikum der Sperrsichtzellen (auch Photoelemente genannt) besteht darin, daß sowohl der Photostrom als auch die Photo-

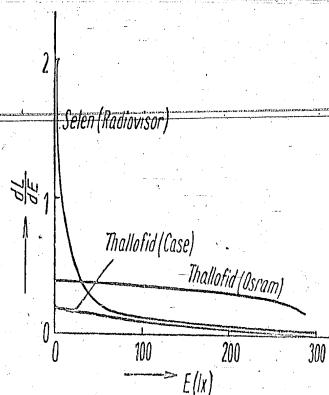


Abb. 95. Empfindlichkeitskurven für techn. Selen- und Thalliumsulfidwiderstandszenellen.

In II, § 5b wurde bereits auf den engen Zusammenhang zwischen Sperrsichtzelle und Gleichrichter hingewiesen. Man wird demnach erwarten können, daß die Sperrsichtzellen beim Anlegen äußerer

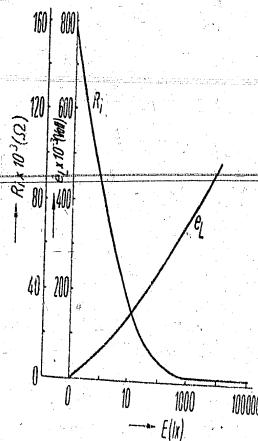


Abb. 99. R_i und e_L in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.

Spannung eine Gleichrichtercharakteristik zeigen. Dies kann in der Tat der Fall sein, wie die Abb. 100 am Beispiel einer Selen-sperrsichtzelle zeigt. Die durch

Kurve b dargestellte Strom-Spannungsabhängigkeit zeigt den unipolaren Charakter der Sperrsicht. Wird die Zelle belichtet (im Beispiel mit 550 Lux), so kann sich bei größerem Vorwiderstand die Belichtung in einer Spannungsänderung oder bei verschwindendem Vorwiderstand in einer Stromänderung auswirken²³¹⁾.

Es ergibt sich die Kurve a , die die Strom-Spannungsabhängigkeit im belichteten Zustand darstellt. Trägt man einmal die durch die Belichtung hervorgerufene

Spannungsänderung Δe und zum anderen die Stromänderung Δi über e auf, so ergeben sich die Kurven c bzw. d , woraus man ersieht, in welchen Bereichen Δe und Δi positiv und in welchen sie negativ sein müssen. Der Schnittpunkt der Kurve a mit der Ordinate ergibt den Kurzschlußstrom i_K , hingegen mit der Ab-

szisse die Leerlaufspannung e_L . Der Grund hierfür liegt darin, daß sich immer die Kurve a ergibt, gleichviel, ob mit größerem oder verschwindendem Vorwiderstand gemessen wird. Der Vollständigkeit halber wird

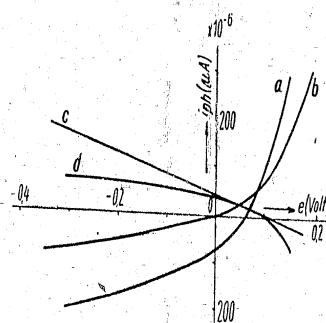


Abb. 100. Strom- bzw. Spannungsänderung durch Belichtung (für Kurve c gilt anderer Ordinatenmaßstab).

noch in Abb. 101 der Einfluß verschiedener Beleuchtungsstärken auf den Verlauf der Kennlinie wiedergegeben.

Für das Verständnis der inneren Vorgänge in einer Sperrsichtzelle ist es oftmals zweckmäßig, sich an Hand eines Ersatzschemas

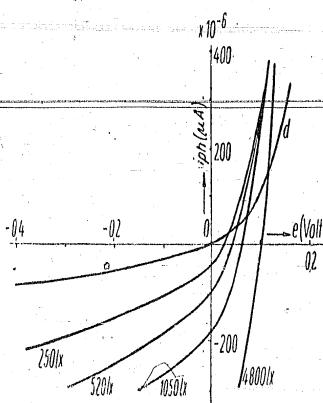


Abb. 101. Einfluß der Beleuchtungsstärke auf den Verlauf der Kennlinien.

zu orientieren. Offenbar kann man der Zelle eine konstante EMK e zuschreiben, die durch einen belichtungsabhängigen Widerstand R_z (R_z proportional der Beleuchtungsstärke E gesetzt, also $R_z = kE$) einen Strom $i + J$ schickt, wobei sich i als Rückstrom über den Zellenwiderstand R_i und J als Strom über den äußeren Widerstand R bemerkbar macht²³²⁾. Durch Anwendung der KIRCHHOFFSchen Gesetze ergibt sich in einfacher Weise

$$\frac{1}{J} = \frac{k}{e} \left(1 + \frac{R}{R_i} \right) \frac{1}{E} + \frac{R}{e}. \quad (76b)$$

Die experimentelle Auswertung der Beziehung (76b) führt zu interessanten Ergebnissen, die insbesondere für die heterochrome Photometrie mit Sperrsichtzellen von Bedeutung sind.

h) Verhalten der Lichtdetektoren und Bleiglanznetzzellen

Es liegt in der Natur des Effektes, daß die Kennlinien der Lichtdetektoren und Bleiglanznetzzellen (VIII) denen der Sperrsichtzellen gleichen. Danach besteht für geringe Beleuchtungsstärken Pro-

portionalität zwischen Kurzschlußstrom und Beleuchtungsstärke. Für höhere Beleuchtungsstärken geht die Proportionalität verloren. Ebenso ist der Charakter der Strom-Spannungskennlinien mit und ohne Belichtung der gleiche.

§ 2. Konstanz bzw. Inkonstanz und Lebensdauer

Die beiden Eigenschaften, Konstanz bzw. Inkonstanz und Lebensdauer, sind insofern recht schwierig zu fassen, weil sie a) von einer Mehrzahl von Parametern abhängig sind, und b) weil für eine Anwendung das Verhalten einer Zelle als hinreichend konstant angesehen werden kann, während die gleiche Zelle für einen anderen Anwendungszweck wegen Inkonstanz nicht brauchbar sein könnte. Es sind also schon die Forderungen nach hinreichender Konstanz der Empfindlichkeit, und zwar sowohl der spektralen als auch der Gesamtempfindlichkeit, und nach ausreichender Lebensdauer nicht einheitlich. Neben der zeitlichen Konstanz der Empfindlichkeit muß außerdem noch die räumliche Konstanz, das ist die von Ort zu Ort der lichtempfindlichen Fläche wechselnde Empfindlichkeit, in Rechnung gesetzt werden.

a) Die „klassische Ermüdung“ der Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

Für die Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt hat in den Jahren nach der Entdeckung des Effektes die Frage nach der „Ermüdung“ eine besondere Rolle gespielt. Unter „Ermüdung“ der Zelle wurde die Änderung ihrer Empfindlichkeit mit der Zeit verstanden. Es hat sich mit der Verbesserung der vakuumtechnischen Hilfsmittel bald gezeigt, daß die „Ermüdung“ durch den Einfluß einer Gasbeladung auf die lichtelektrische Emission der metallischen Kathode hervorgerufen wird (vgl. hierzu die Bemerkungen über den Einfluß der Gasbeladung in IV, § 2g und über die Austrittsarbeit in II, § 2), daß also nicht etwa bei gleichbleibenden Emissionsbedingungen der lichtelektrische Effekt mit der Zeit ab- oder zunehmen kann. Die Kathode behält ihre Emissionseigenschaften prinzipiell bei. Die Forderung der absoluten Konstanz der lichtelektrischen Empfindlichkeit kann also von einer Zelle mit äußerem lichtelektrischen Effekt erfüllt werden, wenn man eine hochentgaste metallische Kathode und eine ebenfalls hochentgaste Anode verwendet und mit besten vakuum-

technischen Mitteln die Evakuierung und die Entgasung des Zellenkörpers vornimmt, so daß nach dem Abziehen der Zelle von der Pumpe keine Gasreste mehr aus der Anode und dem Zellenkörper austreten können. Allerdings wird der Vorteil der absoluten Konstanz der Empfindlichkeit mit einigen Nachteilen erkauft. Einmal haben rein metallische Kathoden nur eine geringe Gesamtempfindlichkeit, und zum anderen liegen die langwelligen Grenzen im sichtbaren (Alkalimetalle) bzw. ultravioletten Spektralbereich (Tab. 3, IV, § 2b).

Trotzdem wird auch eine derartig hochentgaste Zelle nur für eine begrenzte Zeitspanne ihre Eigenschaft, die absolute Konstanz der Empfindlichkeit, beibehalten. Durch allmähliche Diffusion von Gasen durch die Glaswände sowie durch die Kathoden- und Anodenleitungen wird im Laufe der Zeit eine Gasbeladung der Kathode oder wenigstens die Adsorption von Gasatomen an der Kathodenoberfläche möglich werden.

b) Alterung und Lebensdauer der Alkalizellen

Wenn schon für die Zellen mit metallischen Kathoden nur unter Anwendung äußerster Vorsichtsmaßregeln die Konstanz erzielt werden kann, so wird man für Zellen mit zusammengesetzten Kathoden bzw. mit dünnen Schichten (IV, § 3 und § 4) von vornherein absolute Konstanz nicht erwarten. Zwar kann man durch scharfe Entgasungsvorschriften und lange Formierzeiten in der Größenordnung von mehreren Stunden bis zu mehreren Tagen Zellen mit konstanten Eigenschaften herstellen, die für den größten Teil aller Anwendungsgebiete bereits genügen, jedoch liegt es in der Natur der zusammengesetzten Schichten, daß eine absolute Konstanz nicht erzielbar ist. Um in das schwer zu überblickende Gebiet der zeitlichen Inkonstanz zusammengesetzter Kathoden einige Systematik zu bringen, sei unterschieden zwischen a) Alterungerscheinungen, die nicht reversibel sind und sich über längere Zeitperioden, etwa von Monaten, erstrecken²³³), und b) Ermüdungerscheinungen, die reversibel verlaufen und oft, nachdem die Belastung aufgehoben worden ist, nur Minuten oder Stunden andauern. Die Alterungerscheinungen lassen sich auf ein erträgliches Maß durch die bereits erwähnte verlängerte Formierzeit herabsetzen, weil dadurch ein stabilerer Endzustand der zusammengesetzten Schicht schon wäh-

rend des Pumpprozesses erreicht wird. Durch geeignete Wahl des Glases für den Zellenkörper kann man außerdem die allmähliche Diffusion von Gasen, die die Emission beeinträchtigen können, so stark herabsetzen, daß im Mittel mit einem Abfall der Empfindlichkeit von 20% des Anfangswertes pro Jahr gerechnet werden kann.

Als maximale Strombelastung kann man für Vakuum- und gasgefüllte Zellen etwa den Wert von $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ annehmen. Dieser Wert soll lediglich als Richtwert gelten. Für die stabileren und gleichmäßigeren Legierungsschichten kann beispielsweise ohne wesentliche Beeinträchtigung der Lebensdauer auch der doppelte Wert angenommen werden.

Aus dem zu erwartenden Abfall, den eine Zelle in einem Jahr erleidet, läßt sich ungefähr die Lebensdauer für eine ins Auge gefaßte Anwendung bestimmen. Darf z. B. die Empfindlichkeit einer Zelle nicht unter 20% ihres Anfangswertes sinken, ohne die Funktion des lichtelektrischen Gerätes zu gefährden, so beträgt die Lebensdauer der Zelle ein Jahr. Anomale Belastungen, etwa hohe Lichtströme und hohe Spannungen (Größenordnung 1000 V), können einen sofortigen Empfindlichkeitsabfall bis zu 50% der Anfangsempfindlichkeit nach sich ziehen, der nicht mehr rückgängig zu machen ist. Offenbar werden dadurch bleibende Änderungen im Aufbau der Kathodenschicht hervorgerufen.

e) Veränderung der spektralen Verteilung mit der Zeit

Die spektrale Verteilung zuzammengesetzter, mit Sauerstoff sensibilisierter Kathoden ist außerordentlich stark von der Menge des Sauerstoffes abhängig, der vor und während des Formierprozesses auf die Schicht einwirken kann. Um kontrollierbare Verhältnisse zu erhalten, wird man versuchen, den Sauerstoff vor Beginn des Formierprozesses geregt einwirken zu lassen, d. h. eine geregelte Oxydation durchzuführen, und verhindern, daß während des Formierprozesses restlicher Sauerstoff schädlich und unkontrollierbar die Schichtegenschaften beeinflußt. Andernfalls lagern sich in den obersten Schichten Sauerstoffatome (bei schlechten Vakuumverhältnissen auch andere Restgasatome) an, so daß eine spektrale Verteilung erzielt wird, die vor allem bei stärkeren Belastungen

im Dauerbetrieb durch die Diffusion der Restgasatome ins Innere der Schicht Verlagerungen erleiden kann. Beispielsweise beobachtet man an Legierungskathoden besonders dann Verschiebungen des langwelligsten Maximums im Dauerbetrieb nach kürzeren Wellen, wenn das langwelligste Maximum zunächst durch den Einfluß von Sauerstoffspuren in der ersten Oberflächenschicht über $500 \mu\text{m}$ lag und durch nachträgliche Diffusion der Sauerstoffatome ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde, der sich dadurch auszeichnet, daß nunmehr die Sauerstoffreste in der ganzen Schicht verteilt sind und in ihrer Konzentration nicht mehr genügen, das langwelligste Maximum über $500 \mu\text{m}$ zu halten. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Kathode ein derartig instabiles Verhalten aufweist, wird um so geringer sein, je länger der Formierprozeß andauerte, d. h. je mehr die Möglichkeit bestand, bereits an der Pumpe den stabilen Endzustand zu erreichen. Es ist noch nicht einwandfrei erwiesen, ob außerdem durch Umkristallisation oder durch eine andere Art der Schichtumlagerung geringfügige Verschiebungen der spektralen Verteilung, insbesondere bei Legierungskathoden, möglich sind. Man erkennt jedenfalls an den Beispielen, daß Zellen mit starken Alterungerscheinungen vornehmlich dann erhalten werden, wenn in der Fertigung nicht genügend auf einen einwandfreien Formierprozeß geachtet worden ist.

d) Reversible Ermüdung der Alkalizellen

Die reversiblen Ermüdungerscheinungen treten am stärksten an gasgefüllten Zellen mit zusammengesetzten Kathoden auf. Durch den Aufprall der positiven Ionen auf die Kathode wird die Kathodenoberfläche mehr oder minder stark verändert. Wenn auch die Alkaliatome durch starke Adsorptionskräfte an der Kathodenoberfläche festgehalten werden, so kann doch ein heftiges Ionenbombardement besonders die Schichten schädigen, bei denen infolge ihres Aufbaues nicht genügend Alkaliatome im Innern der Schicht zur Verfügung stehen, um an der Oberfläche abgetrommte Alkaliatome zu ersetzen. Dies gilt in starkem Maße für Schichten des Aufbaues $[\text{Ag}]-\text{O}-\text{Cs}$ und $[\text{Ag}]-\text{Cs}_2\text{O}-\text{Cs}^{24}$. Es ist nach diesen Betrachtungen zu erwarten, daß sich eine Glimmentladung, wenn auch nur kurzzeitig betrieben, immer ungünstig auf die Konstanz einer Zelle auswirken muß. Sofern

f) Alterung und Lebensdauer der Widerstandszellen

Auch für Widerstandszellen muß zwischen Alterungs- und Ermüdungerscheinungen unterschieden werden. Die Alterung macht sich durch eine außerordentlich rasch verlaufende Änderung der Empfindlichkeits- und Dunkelwiderstandswerte in den ersten Tagen nach der Herstellung bemerkbar. Die späterhin verbleibenden Änderungen sind sehr viel geringfügiger. Selenwiderstandszellen zeigen einen Anstieg ihrer Empfindlichkeit und ihres Dunkelwiderstandes R_d , der in den ersten Tagen so rasch erfolgt, daß oft von einem Reifungsprozeß, dem sich erst der eigentliche Alterungsprozeß anschließt, gesprochen wird. Die Lebensdauer der Widerstandszelle ist, wenn die Strombelastung nicht über ein normales Maß hinausgegangen ist, so daß plötzlich Kurzschlüsse bleibende Strombrücken hervorrufen, bestimmt durch äußere Einflüsse, wie Feuchtigkeit, Gase, Dämpfe u. a. Offenbar führen elektrolytische Erscheinungen in der Schicht von Selenwiderstandszellen ebenso wie von Selen-Tellurzellen zur Bildung von Selenoxyden, und zwar auch dann, wenn die Zellen im Vakuum angeordnet sind. Allerdings schreitet in letzterem Fall der Verfallsprozeß, wie auch zu erwarten ist, sehr viel langsamer fort.

g) Reversible Ermüdung der Widerstandszellen

Die reversiblen Ermüdungerscheinungen sind bei Widerstandszellen wohl zu unterscheiden von der Trägheit, die die Zellen wegen der Sekundärströme besonders stark anderen Zellen gegenüber (X, § 4d) zeigen. Selenwiderstandszellen weisen bei Belichtung im allgemeinen in den ersten zwei Minuten einen Anstieg des Photostromes auf. Nach Überschreiten eines Maximums fällt der Photostrom oft unter den Anfangswert wieder ab. Selen-Tellurzellen unterscheiden sich von den Selenzellen dadurch, daß das Ermüdungsmaximum erst in einem späteren Zeitpunkt überschritten wird. Die Ermüdung erfolgt bei allen Zelltypen um so schneller, je höher die Beleuchtungsstärke, die Spannung und die Temperatur sind. Die Inkonstanz der Widerstandszelle, hervorgerufen durch die Ermüdungerscheinungen, ist für die Anwendung deswegen sehr viel bedenklicher als bei den anderen lichtelektrischen Organen, weil 1. das Erreichen des Ermüdungsendzustandes sehr viel länger dauert als in allen anderen Fällen und 2. mit

§ 2. Konstanz bzw. Inkonstanz und Lebensdauer

dem Absinken des Photostromes der Dunkelstrom bei fast allen Widerstandszellen steigt. Der in seiner Größe von vornherein unbeliebte Dunkelstrom wird, je höher er liegt, um so eher die normale Strombelastung der Zelle bei Belichtung begrenzen. Als Richtwert für die normale Strombelastung von Widerstandszellen sei ein Wert zwischen 2 und $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ je nach der Zellenart gegeben.

Eine in neuester Zeit beobachtete Erscheinung an Widerstandszellen*) kann zur Erklärung der reversiblen Ermüdung dieser Zellenart ins Feld geführt werden. Wird an eine vollkommen erholte Widerstandszelle eine Wechselspannung angelegt, so wird, falls das System symmetrisch aufgebaut ist, keinerlei Gleichrichterwirkung beobachtet. Anders verhält sich die Zelle, wenn sie vorher mit Gleichspannung belastet war. Sie wird zu einem Gleichrichter und liefert bei Belichtung ohne Vorspannung eine selbständige EMK. Nach einer Zeit, die in der Größenordnung der Erholungszeit ermüdeter Widerstandszellen liegt, ist der Gleichrichtereffekt wieder verschwunden. Es sei die Richtung des Elektronenflusses an einer Selenwiderstandszelle, gleichgültig, ob eine Draht-, Kondensator-, Kamm- oder Flächenzelle vorliegt, beschrieben. Zunächst wird an die erholte Zelle (vgl. Abb. 10) eine Gleichspannung angelegt. Die Elektronen fließen von der Elektrode K_a über den Halbleiter H zur Elektrode A_n . Nach einer Zeit von wenigen Sekunden oder Minuten wird die Batterie aus dem Stromkreis entfernt und unter Belichtung der Zelle ein Elektronenfluß vom Halbleiter H zur Elektrode K_a , also in umgekehrter Richtung, beobachtet. Es ist demnach an der Grenze zwischen K_a und H eine Schicht mit unipolarer Leitfähigkeit entstanden. Der gleiche Versuch mit umgepolter Batterie zeigt, daß nunmehr die Sperrschicht zwischen H und A_n entsteht. Die Größe des Sperrschichtphotoeffektes, der auf diese Weise erzielt wird, liegt etwa zwei Größenordnungen unter der normalen Sperrschichtzellen. Der maximale Sperrschichteffekt wird um so schneller erzielt, je größer der Elektronenstrom ist, der durch die erholte Zelle geschickt wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Elektronenstrom vom reinen Dunkelstrom oder vom Dunkelstrom und

*) Unveröffentlichte Messungen des Verfassers mit W. LANG (auf ähnliche Beobachtungen, als Polarisationserscheinungen bezeichnet, machten 1927 auch RANKINE und AVERY aufmerksam).

einem zusätzlichen Photostrom gebildet wird. Niedrige Beleuchtungsstärken sind, weil der Dunkelstrom dabei in den meisten Fällen einen großen Prozentsatz des Gesamtstromes ausmacht, ohne Einfluß auf die Größe des Sperrschichteffektes. In der Tat bemerkt man erst mit Beleuchtungsstärken oberhalb 2000 Lux einen Einfluß auf den Effekt. Hochohmige Zellen zeigen den Effekt in stärkerem Maße als niederohmige. Es scheint, als sei mit der beobachteten Erscheinung ein weiterer Zusammenhang zwischen Widerstands- und Sperrschichtzellen gefunden.

h) Lebensdauerfragen und Alterung der Sperrschichtzellen

Die Unterscheidung zwischen irreversiblen Alterungs- und reversiblen Ermüdungerscheinungen hat auch für Sperrschichtzellen die Frage nach der Konstanz bzw. Inkonstanz der Zellen klargestellt, so weit es die quantitative Feststellung und nicht die Erklärung der Inkonstanz betrifft.

Sowohl Selen- als auch Thallofidsperrschichtzellen altern. Der Alterungsvorgang wirkt sich in vielen Fällen in einer Abnahme der Gesamtempfindlichkeit aus, während in einigen Fällen eine geringfügige Steigung beobachtet wird. Nach dem Abfall der Gesamtempfindlichkeit um etwa 25% im Höchstfalle bzw. dem Anstieg um wenige Prozent vom ursprünglichen Wert in einer Zeit von 50 bis 100 Tagen (gültig für Selensperrschichtzellen) wird gewöhnlich ein stabiler Endwert erreicht. Thallofidsperrschichtzellen altern nach den bisherigen Erfahrungen viel stärker als Selensperrschichtzellen. Ob die Zellen während ihrer Alterung belichtet werden oder nicht, hat auf den Alterungsprozeß keinen merkbaren Einfluß, so lange nicht übermäßig hohe Beleuchtungsstärken (über 10000 Lux) einwirken. Die Alterungerscheinungen sind vermutlich auf eine chemische Änderung der Halbleiterschicht zurückzuführen. Jedenfalls kann die Inkonstanz der Empfindlichkeit durch Einbau der Zellen in Vakuumgefäß oder in mit inertem Gas gefüllte Kolben wesentlich herabgedrückt werden. Werden die Zellen außerdem mit äußerer Spannung belastet, so geht der Alterungsprozeß schneller vor sich (auf diese Weise ist eine künstliche Alterung möglich). Hohe Spannungsbelastungen setzen allerdings die Lebensdauer wesentlich herab, außerdem besteht Durch-

schlagsgefahr. Die Alterungerscheinung kann sich auch auf die spektrale Verteilung von Selensperrschichtzellen auswirken, und zwar in der Weise, daß diese rotempfindlicher werden. Die gesamte spektrale Verteilung ist dann um einige μ nach dem Rot zu verschoben²³⁷⁾.

i) Reversible Ermüdung der Sperrschichtzellen

Die reversible Ermüdung, besonders an Selensperrschichtzellen untersucht, zeigt einige unerwartete Erscheinungen²³⁸⁾. In bezug auf den zeitlichen Verlauf der Ermüdung ist lediglich zu sagen, daß beim Beginn der Belichtung der Photostrom häufig zunächst ansteigt und dann über ein Maximum gehend einem Endwert zustrebt. Ein großer Teil der Zellen zeigt jedoch kein Ermüdungsmaximum, sondern sofort einen langsamen Abfall bis auf den Endwert. Das Maximum wird, falls also ein Zelltyp mit Ermüdungsmaximum zugrunde liegt, nach etwa 0,5 bis 1 min, der Endwert hingegen nach ~ 15 bis 30 min erreicht. Die Erhöhung erfolgt nach mehrstündiger Dunkelpause. Man vergleiche das ähnliche, jedoch weit ausgeprägtere Verhalten von Selenwiderstandszellen. Der Ermüdungseffekt ist ausgesprochen von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes abhängig²³⁹⁾. Mit größerer Beleuchtungsstärke wird die Ermüdung größer, für höchste Beleuchtungsstärken wird die Ermüdung jedoch unabhängig von der Beleuchtungsstärke. Auffällig ist weiterhin, daß die Ermüdung für schräg auffallendes Licht kleiner als für senkrecht auffallendes sein kann.

Die etwas verwickelten Ermüdungerscheinungen an Selensperrschichtzellen lassen sich offensichtlich vereinfacht darstellen²⁴⁰⁾, wenn man unter Benutzung der Beziehung (76b) den reziproken Wert des Photostromes $\frac{1}{J}$ über den reziproken Wert der Beleuchtungsstärke $\frac{1}{E}$ aufträgt. Nach (76b) ergibt sich eine Gerade, deren Neigung sich je nach der Vorbelastung der Zelle durch Belichtung (also bei Ermüdung) ändert. Die Größe des Ordinatenabschnittes hängt von der Größe des äußeren Widerstandes R ab.

k) Vergleichende Betrachtung

Für alle lichtelektrischen Organe, sofern sie technisch von Bedeutung sind, ergibt sich also, daß eine absolute Konstanz der Empfindlichkeit mit der Zeit nicht erwartet werden darf. Es empfiehlt sich

daher in den Fällen, in denen entsprechend der Anwendung bestimmte Forderungen an die Konstanz gestellt werden müssen, die zur Verwendung gelangende Zelle individuell auf ihr Verhalten zu überprüfen. Scharfe Bedingungen in bezug auf die Konstanz erfüllen immer noch am ehesten die Photozellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt, während die Sperrsicht- und die Widerstandszellen schlechter reproduzierbare Werte ergeben. Die stärksten Ermüdungs- und Alterungsscheinungen weisen die Widerstandszellen auf. Muß man im äußersten Ultrarot (etwa 2 bis 3 μ) arbeiten, bleibt allerdings nur übrig, die Bleisulfidwiderstandszellen oder die Bleiglazenzellen anzuwenden. Man ist also gezwungen, im Ultraroten (bis $\sim 5 \mu$, vgl. VI, § 6) die Bleisulfidwiderstandszellen zu benutzen, weil keine andere Zellentart existiert, die bis in dieses Gebiet hinein Empfindlichkeit zeigt.

§ 3. Temperaturabhängigkeit

Von einer Temperaturabhängigkeit der lichtelektrischen Wirkung sollte nur dann gesprochen werden, wenn sich die Abhängigkeit als reversibel herausstellt. Für alle lichtelektrischen Zellen ergibt sich daher von vornherein die Folgerung, daß die Temperaturabhängigkeit der lichtelektrischen Wirkung nicht bis in das Gebiet der Formiertemperaturen verfolgt werden darf. Andernfalls werden Abhängigkeiten beobachtet, die sich auf veränderten Gasgehalt, auf Modifikationsänderungen, auf Verdampfungsscheinungen u. ä. zurückführen lassen. Für die Praxis bedeutet eine Temperaturbeanspruchung, die irreversible Veränderungen hervorruft, eine Begrenzung der Lebensdauer der Zelle.

a) Temperaturabhängigkeit der Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt

Es sei zunächst untersucht, wie der äußere lichtelektrische Effekt von der Temperatur abhängt. Daß die Elektronen entsprechend ihrer thermischen Zusatzenergie für eine Temperatur $T = 0^{\circ} K$ bereits bei Aufnahme eines Energiequants $h\nu < h\nu_0$ auszutreten vermögen, wurde bereits in II, § 3d erwähnt und bildet den Ausgangspunkt der FOWLERSchen Theorie. Man wird daher den Temperatureinfluß auf die Elektronen nahe der langwelligen Grenze λ_0 erwarten. Das experimentelle Ergebnis zeigt Abb. 23 (IV, § 2). Während für $\lambda \ll \lambda_0$ die thermische Zusatzenergie der Elektronen die spektrale Verteilung

offenbar nicht mehr merklich beeinflussen kann, sollte sich eine durch Temperaturänderung hervorgerufene Änderung der optischen Eigenschaften der Metallocberfläche bzw. des Trägermetalls gerade für kürzere Wellenlängen bemerkbar machen. Dies ist in der Tat für reine Metalle öfter beobachtet worden und äußert sich darin, daß sich die spektralen Verteilungen, die bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen werden, bei einer Wellenlänge $\lambda \ll \lambda_0$ schneiden. Die bei tieferer Temperatur gewonnene Kurve weist also einen steileren Anstieg auf als die bei höherer Temperatur erhaltene²⁴¹). Für zusammengesetzte Kathoden kommt schließlich noch hinzu, daß die an der Oberfläche der Kathode adsorbierten Dipole von der Temperatur beeinflußt werden können. Für einfache Adsorptionsschichten, Ba auf Ni, ist dieser Temperatureinfluß nachgewiesen worden²⁴²). Während sich das Emissionsvermögen kompakter Ba-Schichten in einem Temperaturintervall zwischen 100 und $400^{\circ} C$ als unabhängig von der Temperatur erweist, zeigen Adsorptionsschichten (Ba auf Ni) im gleichen Temperaturbereich mit zunehmender Kathodentemperatur eine Abnahme der Empfindlichkeit. Allerdings sind alle Änderungen der Empfindlichkeit, die durch Temperaturänderungen hervorgerufen werden, so gering, daß man für die praktische Verwendung der Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt von einer Temperaturabhängigkeit in einem Intervall von -40 bis $+80^{\circ} C$, das ist etwa der Bereich, in dem eine praktische Anwendung in Frage kommt, sprechen darf. Mit einiger Sicherheit kann man die modernen Kathoden, also die Cäsiumoxyd- und die Legierungskathoden, im Gebiet zwischen -40 und $+50^{\circ} C$ als temperaturunabhängige lichtelektrische Schichten betrachten. Höhere Temperaturen als $\sim 50^{\circ} C$ führen für zusammengesetzte Kathoden zu irreversiblen Änderungen der Schichten, oft sogar zur vollständigen Zerstörung.

b) Temperaturabhängigkeit der Vervielfacher

Für die lichtelektrischen Vervielfacher müßten sich die gleichen Verhältnisse hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit wie für Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt ergeben, wenn sich die Sekundäremission als unabhängig von der Temperatur erwiese. Dies ist in der Tat der Fall. Die Austrittsenergie der Sekundärelektronen liegt in der

Größenordnung von 10 Elektronenvolt (vgl. II, § 2, Abb. 15), so daß die zusätzliche Energie, die die Elektronen durch die thermische Bewegung erhalten, kaum in Erscheinung treten kann²³⁾. Lediglich beim Überschreiten des Curiepunktes und in der Umgebung des Schmelzpunktes und der allotropen Umwandlungspunkte scheinen Sprünge und Unstetigkeiten des Sekundäremissionskoeffizienten vorzukommen. Praktisch sind jedoch in Vervielfächern diese Unstetigkeiten gänzlich ohne Bedeutung, weil in Vervielfächern zusammengesetzte Sekundäremissionsschichten und nicht reine Metallkathoden verwendet werden. Die zusammengesetzten Schichten zeigen jedoch, sofern ebenfalls der Temperaturbereich -40 bis +50°C nicht überschritten wird, in ihrem Sekundäremissionsvermögen keinerlei irreversible Temperaturabhängigkeit. Höhere Temperaturen können allerdings zu Zerstörungen führen, wenn man den Formiertemperaturen nahekommt.

e) Temperaturabhängigkeit der Widerstandszellen

Ganz anders liegen die Verhältnisse für die Widerstandszellen. Die Halbleiter, welche in erster Linie zur Herstellung technischer Zellen dienten, zeigen alle einen verhältnismäßig hohen Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstandes, der unterschiedliche Werte annehmen kann, je nachdem, ob die Zelle belichtet oder nicht belichtet wird. Außerdem zeigt es sich, daß in gewissen Temperaturintervallen das Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten wechselt kann. Es gibt Selenzellen, deren Dunkel- und Helleitfähigkeiten bis zu tiefen Temperaturen abfallen. Dadurch jedoch, daß die Dunkelleitfähigkeit schneller abnimmt als die Helleitfähigkeit, steigt die Empfindlichkeit solcher Zellen mit fallender Temperatur. Eine zweite Gruppe von Selenzellen zeigt ein ganz anderes Verhalten. Letztere Gruppe zeichnet sich dadurch aus, daß von etwa 0°C nach höheren Temperaturen der Temperaturkoeffizient sowohl des Dunkel- als auch Hellwiderstandes negativ, jedoch nach niedrigeren Temperaturen positiv ist. Für den Dunkel- als auch für den Hellwiderstand wird demnach ein Maximum im Temperaturbereich um 0°C gefunden. Auch bei dieser Gruppe steigt mit abnehmender Temperatur die Empfindlichkeit der Zelle, weil unter 0°C die Helleitfähigkeit sehr viel stärker als die Dunkel-

§3. Temperaturabhängigkeit

leitfähigkeit mit der Temperatur zunimmt, jedoch für Temperaturen oberhalb 0°C mit steigender Temperatur umgekehrt die Dunkelleitfähigkeit stärker als die Helleitfähigkeit. Welcher Gruppe eine Selenzelle angehört und wie stark das Widerstandsmaximum ausgeprägt ist, wenn die Zelle der letzteren Gruppe angehört, hängt wohl in erster Linie vom Kristallisationszustand der Halbleiterschicht ab und außerdem davon, welche Anteile auf die beiden kristallinen Modifikationen entfallen.

In bezug auf ihre Empfindlichkeit besonders oberhalb 0°C erweisen sich die Selen-Tellur-Zellen als temperaturunabhängiger, weil ihr Hell- bzw. Dunkelwiderstand zwischen 0 und 40°C nahezu temperaturunabhängig ist. Für Thalloidzellen liegen die Verhältnisse insofern anders, als bei fallender Temperatur, etwa bis zur Temperatur der flüssigen Luft, der Dunkelwiderstand sowie der Hellwiderstand steigen, letzterer etwas stärker als der Dunkelwiderstand²⁴⁾. Die Empfindlichkeit ist von tiefen Temperaturen bis zur Zimmertemperatur aufwärts nahezu konstant und nimmt erst nach höheren Temperaturen beträchtlicher ab. Die Photoleitfähigkeit des Cu₂O, $\Delta\sigma$, nimmt bei Temperaturabnahme nach dem Gesetz

$$\Delta\sigma = a e^{\frac{u}{2kT}} \quad (76c)$$

zu, wenn unter u die Dissoziationsenergie eines Elektrons verstanden wird²⁵⁾.

Es liegt nach den bisherigen Ausführungen über die Temperaturabhängigkeit nahe, die Widerstandszellen im tiefgekühlten Zustand anzuwenden. Wie jedoch in X, § 4d ausgeführt ist, wird mit abnehmender Temperatur der Zellen ihre Frequenzabhängigkeit größer. Die Empfindlichkeitssteigerung ist demnach mit diesem Nachteil zu erkauften.

Wenn Ultrarotzellen (PbS-, PbSe-Widerstandszellen oder Bleiglanznetzzellen) im gekühlten Zustand für die Messung kleinsten Strahlungsintensitäten Benutzung finden, so hat man auf den Einfluß der Umgebungsstrahlung ein Augenmerk zu richten. Durch Untersuchungen von WATTS²⁶⁾ wird gezeigt, daß die Leitfähigkeitsmessungen an PbS unter Vernachlässigung der Umgebungsstrahlung zu unrichtigen Werten führen können. Um den Vorteil der gesteigerten Empfindlichkeit

durch Kühlung der lichtempfindlichen PbS-Schicht voll ausnutzen zu können, muß eine technische Form gefunden werden, wobei die Schicht bis auf ein kleines Strahlungseintrittsfenster durch ein tiefgekühltes Aufbengehäuse geschützt ist. Man verhindert dadurch, daß die Differenz der Leitfähigkeiten im Hellen und im Dunklen durch die Umgebungsstrahlung vermindert wird.

d) Temperaturabhängigkeit der Sperrsichtzellen

Die Frage danach, ob auch der Sperrsichtphotoeffekt von der Temperatur abhängt, wird man deshalb sofort bejahend beantworten, weil, wie im Fall der Widerstandszellen, beim Aufbau der Sperrsichtzellen Halbleiter mit großem Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstandes beteiligt sind. Man wird auch erwarten, daß der Photostrom (Kurzschlußstrom) in anderer Weise von der Temperatur abhängt als die Photospannung (Leerlaufspannung), weil der temperaturabhängige Widerstand der Halbleiterschicht den Photostrom beeinflußt, während die temperaturabhängigen Eigenschaften der Sperrsicht auch die Photospannung erfassen.

Die ersten Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit des Sperrsichtphotoeffektes erfolgten am Cu_2O ²⁴⁷. Sie zeigten an Cu_2O -Hinterwand- und Vorderwandzellen die erwartete starke Temperaturabhängigkeit sowohl für den Photostrom als auch für die Photospannung. Der Zahlenwert des Temperaturkoeffizienten des Photostromes von Hinterwandzellen liegt im Temperaturbereich von -20 bis $+80^\circ\text{C}$ zwischen $-0,0086$ und $-0,0116$. Für Pt-bestäubte Vorderwandzellen hat der Temperaturkoeffizient des Photostromes im Temperaturbereich von -20 bis $+60^\circ\text{C}$ etwa den Wert $+0,01$. Von diesen Werten weichen die Werte der Temperaturkoeffizienten Au-, Ag- und Ni-bestäubter Zellen ab. Verwickelt werden die Verhältnisse dann, wenn Zellen benutzt werden, die den Vorder- und Hinterwandeffekt gleichzeitig zeigen, denn die beiden Effekte weisen Temperaturkoeffizienten mit entgegengesetztem Vorzeichen auf. Überdies verschiebt sich das Maximum, welches Cu_2O -Hinterwandzellen bei $615\text{ m}\mu$ besitzen, wie in VII, § 1e bereits erwähnt ist, mit abnehmender Temperatur um $\sim 30\text{ m}\mu$, wenn die Temperatur von $+65$ auf -150°C absinkt.

§ 3. Temperaturabhängigkeit

Einen wesentlich geringeren Einfluß der Temperatur auf den Photostrom findet man an Selensperrsichtzellen^{238), 239)}. Bei einer Temperatur von $\sim 15^\circ\text{C}$ weist der Photostrom ein flaches Maximum auf. Sowohl nach hohen als auch nach tiefen Temperaturen hin beträgt der absolute Wert des Temperaturkoeffizienten etwa $0,0003$. Ist der Außenwiderstand groß, so können wesentlich unübersichtlichere Verhältnisse eintreten. Es ist daher zweckmäßig, den Außenwiderstand niedrig zu halten (etwa < 1000 Ohm). Ein starkerer Temperaturein-

fluß, der außerdem von der Beleuchtungsstärke abhängt, ist für die Leerlaufspannung nachweisbar (vgl. Abb. 102). Für sehr genaue Messungen ist zu beachten, daß im roten Teil der spektralen Verteilung mit ansteigender Temperatur (etwa zwischen $+15$ und $+40^\circ\text{C}$) eine Steigerung der Empfindlichkeit auftritt, wie es auch oft an Selenwiderstandszellen zu beobachten ist²⁴⁰⁾. Im roten Teil besitzt der Photostrom in dem angegebenen Temperaturbereich einen schwach positiven, hingegen im übrigen Teil der spektralen Verteilung einen negativen Temperaturkoeffizienten.

Die Abhängigkeit des Photostromes einer Thalliumsulfid-Sperrsichtzelle von der Temperatur verläuft in der Weise, daß bis zu einer Temperatur, die zwischen -5 und -45°C liegen kann, ein Anstieg des Photostromes beobachtet wird. Nach Überschreiten einer Maximalempfindlichkeit vermindert sich der Photostrom fortgesetzt bis herab zu Temperaturen von -180°C .

Bemerkenswert ist, daß die Photo-EMK der Goosschen Sperrsichtzellen (vgl. VII, § 5) im Bereich von etwa -180°C bis $\sim +50^\circ\text{C}$ als praktisch unabhängig von der Temperatur angesehen werden kann. Im Bedarfsfalle dürfte sich daher die Entwicklung einer technischen Zelle mit CdSCu -Phosphor als Halbleiterschicht lohnen.

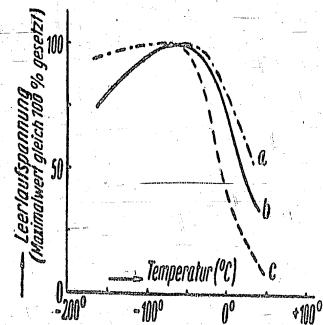


Abb. 102. Prozentuale Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung einer Se-Sperrsichtzelle für Beleuchtungsstärken a) von 100 lx, b) von 10 lx und c) von 1 lx.

e) Temperaturabhängigkeit der Bleiglanznetzzeilen

Auch die Bleiglanznetzzeilen, also Zellen aus natürlichen Kristallen, zeigen verständlicherweise eine starke Temperaturabhängigkeit ihres Widerstandes. Man kann daher auch diese Zellen im tiefgekühlten Zustand zur Messung benutzen mit dem Vorteil einer beträchtlichen Empfindlichkeitssteigerung. Normale Bleiglanznetzzeilen weisen bei Zimmertemperatur Empfindlichkeiten von $\sim 10 \text{ mV/lm}$ auf, die sich bei Kühlung mit flüssiger Luft ungefähr auf das 100fache steigern lassen.

f) Vergleichende Betrachtung

Die wichtigste Folgerung, die sich aus dem Abschnitt über die Temperaturabhängigkeit für die Anwendung der lichtelektrischen Zellen ergibt, ist die, daß Widerstandszellen und Sperrsichtzellen, die in breiteren Temperaturintervallen Verwendung finden sollen, auf ihre Temperaturabhängigkeit überprüft werden müssen, wenn nicht von vornherein ersichtlich ist, daß überschlagsmäßig die Änderung der lichtelektrischen Eigenschaften zu keiner Betriebsstörung des lichtelektrischen Gerätes führt.

§ 4. Frequenzabhängigkeit

Der lichtelektrische Primärakt, d. h. die Übertragung der Energie eines einfallenden Lichtquants auf ein Elektron, vollzieht sich sicher in einer Zeit $< 10^{-9} \text{ sek}$. Wenn jedes der abgelösten Elektronen sofort, also trägeheitslos, nachzuweisen wäre, könnte Wechsellicht bis zu einer Frequenz, deren reziproker Wert in die Größenordnung der Ablösezeit kommt, trägeheitsfrei in Stromschwankungen umgesetzt werden, wobei die Modulationstiefe des lichtelektrischen Stromes der des Lichtstromes entspräche. Es ist zu untersuchen, wieweit die lichtelektrischen Organe trägeheitsfrei arbeiten und welche Frequenzcharakteristik oder Frequenzabhängigkeit sie besitzen. Eine Frequenzcharakteristik gibt einen Überblick darüber, wieweit eine Zelle den Lichtmodulationen nieder- und hochfrequenter Art zu folgen vermag. Es wird also der Photostrom in Abhängigkeit von der Frequenz der intermittierenden Belichtung festgestellt, wobei die Zellenspannung jeweils konstant gehalten wird.

§ 4. Frequenzabhängigkeit

a) Frequenzabhängigkeit der Vakuumzellen

Am ehesten wird man die Trägheitsfreiheit von den Vakuumphotozellen erwarten. In der Tat könnte nur die Kapazität der Zelle eine Frequenzabhängigkeit hervorrufen. Bis zu Frequenzen von einigen 100 kHz ist jedoch wegen der Kleinheit der Zellenkapazität keine merkbare Frequenzabhängigkeit zu beobachten. Eine natürliche Grenze ist der Trägheitslosigkeit durch die Geschwindigkeit der Elektronen gesetzt, mit der sie den Raum zwischen den Elektroden durch-

eilen. Es muß daher darauf gesehen werden, daß die Elektronengeschwindigkeiten bei vorgegebenen Elektrodenabständen genügend groß sind. In Vakuumzellen können die Elektronen durch Zusammenstöße keine Herabsetzung ihrer Geschwindigkeiten erleiden, so daß für normale Vakuumzellen, wenn die Frequenz des einfallenden Lichtes noch nicht mit den Elektronenlaufzeiten vergleichbar ist, die Elektronengeschwindigkeiten immer hinreichen, um die Trägheitslosigkeit der Zelle zu garantieren. Ein anderes Ergebnis wird erzielt, wenn man hochfrequent moduliertes Licht (Frequenz $> 5 \text{ MHz}$) auf die Vakuumzelle wirft, wenn also Elektronenlaufzeiten und Verschiebungsströme eine besondere Rolle zu spielen beginnen. Zunächst wird die Strom-Spannungscharakteristik (X, § 1b) in der Weise beeinflußt, daß im Raumladengebiet kurz vor Beginn der Sättigung ein ausgeprägtes Maximum mit einem anschließenden Minimum auftritt. Das Maximum liegt etwa um das Doppelte höher als der Sättigungswert. Es liegt nahe, die Abweichungen von der normalen Strom-Spannungscharakteristik als eine Resonanz zwischen pendelnden Elektronen und der Modulationsfrequenz des Lichtes aufzufassen. Neben dieser die Strom-Spannungscharakteristik betreffenden Abnormalität kann ein weiterer Effekt an Vakuumzellen unter Belichtung mit hochfrequent-moduliertem Licht beobachtet werden. Es kann nämlich im äußeren Stromkreis der Vakuumzelle ein hochfrequenter Wechselstrom entstehen, ohne daß eines der ausgelösten Elektronen die Anode überhaupt erreicht²⁵⁰.

In bezug auf die Vakuumzelle kann zusammenfassend festgestellt werden, daß im Bereich der Hörfrequenzen bis zu Frequenzen, die im Fernsehen üblich sind ($\sim 2 \text{ MHz}$), für diese Zellenart Trägheitsfreiheit angenommen werden darf.

b) Frequenzabhängigkeit der gasgefüllten Zellen

Betreibt man gasgefüllte Zellen mit Spannungen, die kleiner sind als die Ionisierungsspannung, so verhalten sie sich in bezug auf die Trägheit ebenso wie Vakuumzellen, d. h. sie sind für diesen Spannungsbereich frequenzunabhängig. Erst beim Einsetzen der Ionisation wird Trägheit beobachtet, so daß man die Ursache dafür den gebildeten positiven Ionen zuschieben muß. Nun ist die Aufbauzeit der Ionen- und Elektronenlawine so klein und die Ionenlaufzeiten liegen in der Größenordnung von 10^{-6} sek, daß erst für Lichtwechsel oberhalb ~ 15000 Hz die Entstehung und die Bewegung der Ionen als Ursache der Trägheit angesehen werden dürfen. Man muß daher für niedere Frequenzen annehmen, daß die Rekombination zu Atomen des Füllgases in der Dunkelperiode noch nicht abgeschlossen ist, wenn die neue Belichtung bereits einsetzt und aus diesem Grunde die Rekombinationsverzögerung für die Trägheit der gasgefüllten Zellen bei niedrfrequenten Lichtwechseln verantwortlich machen. Es bleiben in der Dunkelperiode eine große Zahl langlebiger Ionen übrig. Während der Belichtung entstehen neben den Ionen metastabile Atome (Lebensdauer $\sim 10^{-3}$ sek), die Fremgasbeimengungen mit niedriger Ionisierungsspannung auch noch in der Belichtung nachfolgenden Dunkelperiode ionisieren, so daß die Trägheit nicht nur durch die Rekombinationsverzögerungen allein, sondern auch durch die Wirkung der metastabilen Atome bestimmt wird. Die genauere Untersuchung zeigt, daß der Photostrom im Augenblick der Belichtung auf den vollen Wert springt, jedoch abklingt, wenn die Belichtung unterbrochen wird. Die Abklingzeiten (Größenordnung 10^{-3} sek) sind am kleinsten für Ar-Füllung, größer für He- und Ne-Füllung oder für Füllung aus Edelgasgemischen. Geringer Wasserstoffzusatz zur Ar-Füllung soll die Trägheit reiner Ar-gefüllter Zellen weiter herabsetzen. Jedoch ist Wasserstoffzusatz nur für hydrierte Zellen anzuwenden, wenn man Wert auf stabiles Verhalten der Zellen legt. Die Frequenzabhängigkeit einer mit Ar-gefüllten Cäsiumoxydzelle wird durch die Abb. 103 veranschaulicht. Die Abbildung gibt einen Überblick bis zu Lichtfrequenzen von 36000 Hz. Mit steigender Saugspannung wird der Frequenzabfall immer größer, weil der durch die Stoßionisation hervorgerufene Stromanteil einen immer größeren Beitrag zum Gesamtstrom liefert.

§ 4. Frequenzabhängigkeit

Das gleiche Verhalten kann man der Abb. 104b entnehmen, bei der als Abszisse wiederum die Frequenz des Wechsellichtes, jedoch bis ins hochfrequente Gebiet hinein, aufgetragen ist. Zur besseren Übersicht sind in Abb. 104a die Strom-Spannungskarakteristiken für eine Lichtfrequenz von 5000 Hz (α , Niederfrequenz), von 35 kHz (β) und von

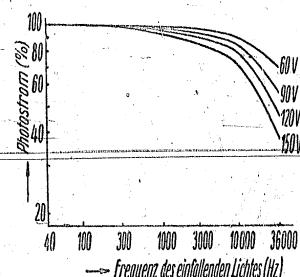


Abb. 103. Frequenzabhängigkeit einer Ar-gefüllten Cs_2O -Zelle.

70 kHz (γ , Hochfrequenz) danebengestellt. Als neues Ergebnis für hochfrequente Lichtwechsel kommt hinzu, daß alle Kurven unabhängig von der Saugspannung in eine Parallele zur Abszisse einmünden, d. h. mit anderen Worten, im Gebiet hochfrequent modulierten Lichtes sind die gasgefüllten

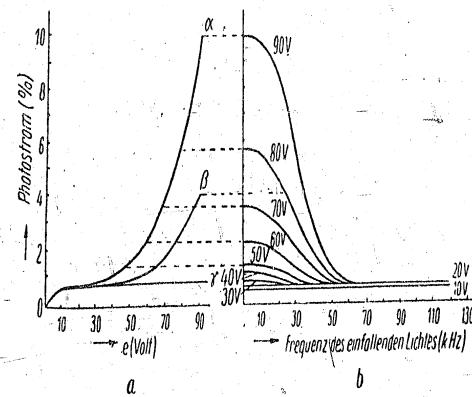


Abb. 104. Frequenzcharakteristiken (Schema) einer gasgefüllten Zelle (b) und Strom-Spannungscharakteristiken (a).

Zellen spannungs- und frequenzunabhängig. Der Punkt, in welchem die Spannungs- und Frequenzunabhängigkeit einsetzt, ist unabhängig von der Geometrie der Zelle und der Art des Füllgases²⁵¹⁾-²⁵²⁾.

c) Frequenzabhängigkeit der Vervielfacher

Die Frequenzabhängigkeit lichtelektrischer Vervielfacher hat nahezu denselben Verlauf wie die der Vakuumzellen (vgl. Abb. 105). Ein merklicher Abfall wird erst oberhalb von etwa 5 MHz festgestellt. Die experimentell gefundene Kurve kann auch theoretisch erhalten werden, denn maßgeblich für die Frequenzabhängigkeit sind die Elektronenlaufzeiten, deren Verteilung über die Zahl der Elektronen durch Messen der Geschwindigkeitsverteilung gewonnen werden kann. Die Zeit, die zwischen dem Auftreten eines Primärelektrons und der Auslösung der Sekundärelektronen vergeht, liegt sicher in der Größenordnung von 10^{-9} sek²⁵³.

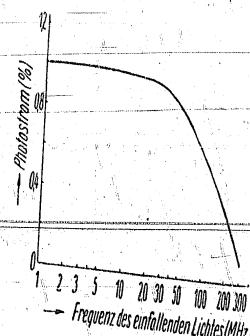


Abb. 105. Frequenzabhängigkeit eines Vervielfachers.

d) Frequenzabhängigkeit der Widerstandszellen

In II, § 4b wurde darauf hingewiesen, daß der innere lichtelektrische Effekt mit erheblicher Trägheit behaftet ist und daß die Sekundärströme dafür verantwortlich zu machen sind. Die technischen Widerstandszellen sind daher in diesem Punkte den anderen Zellenarten unterlegen. Zwar haben alle modernen Widerstandszellen älteren Typen gegenüber eine wesentlich verbesserte Frequenzabhängigkeit aufzuweisen, dennoch zeigt ein einfacher Vergleich der Kurven (z. B. Abb. 106 gegen Abb. 104) die große Überlegenheit des äußeren lichtelektrischen Effektes. Der technische Fortschritt, der in bezug auf die verbesserten Trägheitsverhältnisse erzielt worden ist, ergibt sich aus der vergleichenden Betrachtung der Kurven b und c der Abb. 106. Im Gegensatz zum äußeren lichtelektrischen Effekt springt der Photostrom im Falle der Belichtung einer Widerstandszelle nicht sofort auf seinen größten Wert, sondern es ist eine sogenannte Belichtungsträgheit festzustellen. Die Zelle folgt auch der Unterbrechung der Belichtung nicht sofort, so daß man eine Verdunklungsträgheit von der Belichtungsträgheit zu unterscheiden hat. Verdunklungsträgheit

und Belichtungsträgheit haben unterschiedliche Größe, erstere ist im allgemeinen größer als letztere. Wie bereits in X, § 2g erwähnt worden ist, muß man die Ermüdung von der Trägheit wohl unterscheiden. Für Thalofidzellen lassen sich diese beiden Erscheinungen leichter

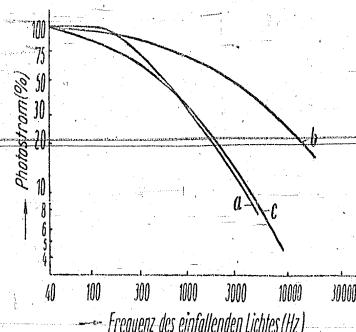


Abb. 106. Frequenzabhängigkeit einer technischen Selenzelle (a), einer Thalofidzelle neuer Bauart (b) und einer Thalofidzelle älterer Bauart (c).

auseinanderhalten als für Selenzellen, weil für Thalofidzellen die Zeit zum Erreichen des größten Photostromes in der Größenordnung von 10^{-2} sek liegt, während sich die Ermüdungserscheinungen in der Größenordnung von Minuten abspielen. Bei Selenwiderstandszellen hängen Ermüdung und Trägheit in starkem Maße von der Vorbehandlung der Schichten ab. Man unterscheidet die harten Zellen (große Trägheit, geringe Ermüdung) von den weichen Zellen (geringe Trägheit, größere Ermüdung).

Die Trägheit aller Widerstandszellen wird von mehreren Faktoren beeinflußt. Eine bedeutsame Rolle spielt die Schichtdicke, je dünner die Schicht, um so geringer die Trägheit (vgl. die günstigste Schichtdicke betreffend VI, § 3b). Ferner wird die Trägheit beeinflußt von der Spannung, der Beleuchtungsstärke, der Wellenlänge des eingeschalteten Lichtes und der Temperatur. Erhöhte Temperatur, erhöhte Spannung und erhöhte Beleuchtungsstärke setzen in den meisten Fällen die Trägheit herab, während die Einstrahlung längerwelligen Lichtes meistens eine größere Trägheit verursacht. Die Trägheit der Widerstandszellen wird im allgemeinen als ihr größter Nachteil empfunden.

Die Frage nach der Frequenzabhängigkeit von Widerstandszellen in Abhängigkeit von der Temperatur hat deshalb wieder wachsende Bedeutung gewonnen, weil für den ultravioletten Bereich die Benutzung gekühlter Bleisulfid-, Bleiselenid- bzw. Bleitelluridwiderstandszellen (vgl. VI, § 6) mehr und mehr zunimmt. Die Lebensdauer der im Stoff vorhandenen Ladungsträger ist mit der Temperatur des Stoffes verknüpft. Bei fallender Temperatur vergrößert sich die Lebensdauer der Ladungsträger und damit wird die Frequenzabhängigkeit größer. Nach noch unveröffentlichten Messungen von RYWKIN beträgt beispielsweise die Lebensdauer der Ladungsträger im Cu_2O $1,3 \times 10^{-5}$ sek bei 20°C und großenordnungsmässig einige Sekunden bei -80°C .

e) Frequenzabhängigkeit der Sperrsichtzellen

Die Frequenzabhängigkeit der Sperrsichtzellen erweist sich als unterschiedlich, je nachdem, ob ohne oder mit Vorspannung gearbeitet wird. Ohne Vorspannung erwartet man keine oder wenigstens nur eine geringe Frequenzabhängigkeit, weil in diesem Falle vornehmlich reine Primärströme fließen. Die Zellenkapazitäten haben jedoch einen so großen Einfluß, daß eine erhebliche Frequenzabhängigkeit auf-

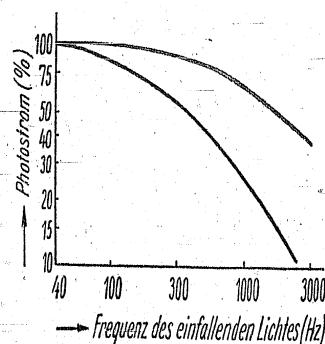


Abb. 107. Frequenzabhängigkeit einiger Selensperrsichtzellen.

tritt (vgl. Abb. 107). Kupferoxydul-Vorderwand- und -Hinterwandzellen sind weniger frequenzabhängig als Selensperrsichtzellen, wie aus einem Vergleich zwischen den Abb. 107 und 108 hervorgeht. Eine Entscheidung darüber, worauf die ungünstigeren Verhältnisse an Selensperrsichtzellen zurückzuführen sind^{248, 251, 254}), läßt sich

§4. Frequenzabhängigkeit

schwer fällen. Es scheint wiederum aus bisher noch unbekannten Gründen, daß es seien die für Sperrsichtzellen günstigsten Frequenzabhängigen mit Thalliumsulfidsperrsichtzellen zu erzielen. Abb. 109 zeigt den Frequenzgang einer solchen Zelle bis 20000 Hz.

Messungen mit Vorspannung haben ergeben, daß mit großerer Vorspannung die Frequenzabhängigkeit wesentlich ungünstiger wird. Durch das Auftreten von Sekundärströmen ähneln die Verhältnisse denen, die an Widerstandszellen zu beobachten sind.

Aufklärung über die Trägheitserscheinungen lassen sich vermutlich durch Untersuchungen, wie sie an Widerstandszellen angestellt worden sind, gewinnen, wenn man die Belichtungs- sowie Verdunklungsträgheiten ohne und mit Vorspannung untersucht²⁵⁵).

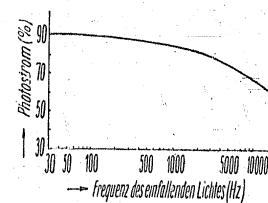


Abb. 108. Frequenzabhängigkeit von Cu_2O -Vorder- (a) und Hinterwandzellen (b) im Vergleich zu einer Se-Sperrsichtzelle (c).

Die gute Frequenzcharakteristik der Thalliumsulfidsperrsichtzellen kann wahrscheinlich in erster Linie auf die geringe spezifische Kapazität der Zelle, hervorgerufen durch dicke Halbleiterschichten, und auf die Kleinheit der lichtempfindlichen Fläche zurückgeführt werden.

Ungünstiger als alle bisher bekannten Sperrsichtzellen in bezug auf die Frequenzabhängigkeit verhalten sich die Silbersulfidsperrsichtzellen, die bei 1000 Hz einen Abfall ihrer Empfindlichkeit auf $\sim 1\%$ ihres maximalen Wertes zeigen. Während Selensperrsichtzellen eine spezifische Kapazität von etwa $0,04 \frac{\mu\text{F}}{\text{cm}^2}$ und Thalofidsperrsichtzellen von $\sim 0,1 \frac{\mu\text{F}}{\text{cm}^2}$ im Mittel aufweisen, zeigen Silbersulfidsperrsichtzellen eine spezifische Kapazität bis zu $\sim 30 \frac{\mu\text{F}}{\text{cm}^2}$.

woraus sich in erster Linie die starke Frequenzabhängigkeit der Silbersulfidsperrschichtzellen erklären läßt²⁵⁶).

f) Frequenzabhängigkeit der Bleiglanznetzzellen

Von KAROLUS und MANGOLD wurde gezeigt, daß die Bleiglanznetzzellen bis zu etwa 40000 Hz nicht frequenzabhängig sind. Überdies ist eine besondere Eigenschaft der Bleiglanznetzzellen wert, hervorgehoben zu werden, und zwar ist bei hoher noch zusätzlicher Gleichbelichtung (etwa 20000 Hz) nur eine Einbuße von ca. 20% der Empfindlichkeit vorhanden, während alle anderen Zellenarten eine Empfindlichkeitsabnahme von wenigstens 40% (Vakuumzellen besonderer Konstruktion), in den meisten Fällen sogar von wenigstens 70% besitzen.

§ 5. Nachweisgrenze

a) Obere und untere Nachweisgrenze

Wie bereits aus X, § 2 hervorgeht, ist nach oben für alle lichtelektrischen Zellen eine Nachweisgrenze gesetzt, d. h. oberhalb einer gewissen Beleuchtungsstärke leidet die Lebensdauer der Zelle oder es muß mit einem außerordentlich inkonstanten Verhalten gerechnet werden. Man hilft sich in einfachster Weise durch Anwendung von Lichtschwächungsmitteln, wobei meist durch einfache mathematische Zusammenhänge die wahre Beleuchtungsstärke bestimmt werden kann. Die untere Nachweisgrenze hingegen hängt von der Größe des Störpegels oder des Rauschens der Zelle ab. Die Signalspannung, wenn sie mit Sicherheit noch als eine solche erkannt werden soll, muß wenigstens um eine Zehnerpotenz (in speziell gelagerten Fällen wenigstens um den Faktor 2) höher liegen als die Rauschspannung. Um für die lichtelektrischen Organe die untere Nachweisgrenze festlegen zu können, ist es daher notwendig zu wissen, woher das Rauschen röhrt und auf welche Größenordnung die Rauschspannung herabgedrückt werden kann.

b) Rauschverhältnisse der Vakuumzellen

Betrachtet man zunächst eine Hochvakuumphotozelle mit einem Kopplungswiderstand R , so findet man vier Störursachen, die den Gesamtstörpegel für die Zelle mitsamt des Kopplungswiderstandes

bilden. Der ausgelöste Photostrom in der Zelle wird von einer Summe von einzelnen Elektronen gebildet, und für den Fall der Sättigung, wenn also alle ausgelösten Elektronen die Anode erreichen, wird man annehmen können, daß ein einzelnes Elektron völlig unbeeinflußt von weiteren Elektronen seinen Flugweg zur Anode zurücklegt. Das einzelne Elektron weiß nicht, ob mit ihm weitere Elektronen ausgelöst worden sind oder nicht. Der Photostrom wird demnach Schwankungen unterworfen sein, die als Schroteffekt [SCHOTTKY²⁵⁷] bezeichnet werden. Im Sättigungsgebiet läßt sich das durch den Schroteffekt hervorgerufene Quadrat des Effektivwertes des Rauschstromes i_{Sch}^{-2} aus Gleichung (77)

$$i_{Sch}^{-2} = 2 \varepsilon i \Delta v \quad (77)$$

nach SCHOTTKY bestimmen. Hierin bedeuten Δv die Bandbreite in Hz und i den Sättigungsstrom in Ampere. Aus Gleichung (77) geht hervor, daß für Frequenzen, deren Periodendauer klein gegen die Elektronenlaufzeiten sind, der Rauschstrom für gleiche Frequenzintervalle konstant ist, gleichgültig, wie hoch die mittlere Frequenz des Intervalls ist. Für sehr hohe Frequenzen nimmt der Rauschstrom mit steigender Frequenz ab.

Im Gebiet der Raumladung gelangen die ausgelösten Elektronen nicht mehr ohne gegenseitige Beeinflussung zur Anode. Der Schroteffekt wird geringer. Ist $F^2 (< 1)$ der Faktor der Raumladeschwächung, so gilt für raumladungsbegrenzte Elektronenströme

$$i_{Sch}^{-2} = 2 \varepsilon F^2 i \Delta v. \quad (78)$$

Ein weiterer Effekt, der Funkel- oder Flackereffekt, tritt an zusammengesetzten Kathoden, vornehmlich an Glühkathoden, bei niedrigen Frequenzen auf [SCHOTTKY, JOHNSON²⁵⁸]. Da sich der Funkeleffekt besonders bemerkbar macht, wenn hohe Emissionsströme fließen, spielt er für Vakuumzellen nur eine untergeordnete Rolle. Der Funkeleffekt hat seine Ursache darin, daß an der Emissionsoberfläche spontane Umlagerungen erfolgen, woraus resultiert, daß die Emission schwanken kann. Neuere Versuche, insbesondere die Untersuchung der Frequenzabhängigkeit des Effektes, lassen auf eine Ähnlichkeit des Funkeleffektes mit dem Halbleiterrauschen schließen. Die

d) Rauschverhältnisse der Vervielfacher

Der zweite gangbare Weg, den Photoelektronenstrom in der Zelle selbst zu verstärken, brachte die Konstruktion der Vervielfacher. Für einen Vervielfacher mit Kopplungswiderstand ergibt sich

$$S_v^2 = \frac{M^2 v_{ges}^2 i_{ph}^2 R}{\left(2 \varepsilon v^n - 1 - i_{ph} R + 4kT\right) 4v} \quad (84)$$

und unter Vernachlässigung $v^{n+1} - 1 \approx v^n + 1$

$$\text{und } 4kT \ll 2 \varepsilon v^n - 1 \quad i_{ph} R \\ S_v^2 = \frac{M^2 i_{ph} v - 1}{2 \varepsilon 4v} \quad (85)$$

Die Gleichung (85) gilt, wenn der Vervielfacher mit Gleichspannung betrieben wird; an Wechselspannung gelegt ist der Schroteffekt des Vervielfachers größer.

Daß es gelegentlich auch zu größeren als den errechneten Rauschspannungen kommen kann, ist mehrfach gezeigt worden. Trägt beispielsweise die Röhrenwandung des Vervielfachers hohe positive Aufladung gegen die meisten der Vervielfacherelektroden, so können einige der thermischen Schrotelektronen Szintillationen in der Röhrenwandung hervorrufen, die ihrerseits vom Vervielfacher als Lichtblitze erfaßt werden und damit als Rauscherhöhung in Erscheinung treten²⁰¹.

Eine bedeutsame Frage ist häufig die nach den Vorteilen, die die Verwendung eines Vervielfachers für den Nachweis kleinsten Signale an Stelle einer Photozelle mit anschließendem Röhrenverstärker bringt. Eine primitive Übersicht läßt folgendes erkennen: Die Photozellen mit Röhrenverstärker zeigen ein Gesamtrauschen, das sich aus dem Rauschen der Photozelle, dem thermischen Elektronenrauschen des Kopplungswiderstandes und dem Rauschen der ersten Verstärkeröhre zusammensetzt. Dadurch, daß das Widerstandsrauschen zahlenmäßig die beiden anderen Rauschquellen überwiegt, können nur Signale aufgenommen werden, die über dem Widerstandsrauschen liegen. Anders verhält es sich mit dem Vervielfacher. Wiederum bildet die erste Rauschquelle das Rauschen im Photozellenteil. Es folgt ein neu auftretendes Rauschen, hervorgerufen durch die Sekundäremission,

dem sich das Widerstandsrauschen des im Ausgang des Vervielfachers liegenden Widerstandes anschließt. Zwar ist wiederum das Widerstandsrauschen am größten, jedoch ist das Signal durch den Vervielfacher so weit verstärkt, daß es sicher über dem Widerstandsrauschen liegt. Die Nachweisgrenze wird allein durch das Rauschen des Photozellenteiles festgelegt²⁰². Ein praktisches Beispiel wird mit Hilfe der Abb. 110 veranschaulicht²⁰³.

Es handelt sich um die Daten eines achtstufigen Vervielfachers mit einer Photokathodenempfindlichkeit von $15 \cdot 10^{-6} \text{ A/lm}$.

Gewisse Vorsicht ist am Platze, wenn mit dem Vervielfacher Gleichlichtmessungen ausgeführt werden müssen. Der von der Photokathode herrührende Dunkelstrom wird vervielfacht und täuscht einen Photostrom vor. Die niedrigste einfallende Lichtintensität, die noch nachweisbar ist, muß also einen Photostrom hervorrufen, der mit Sicherheit über dem verstärkten Ausgangsdunkelstrom liegt. Gebildet wird der Dunkelstrom in erster Linie von Elektronen, die thermisch an der Photokathode und an den Sekundärkathoden, vor allem, wenn es sich um Cäsiumoxydkathoden handelt, abgelöst worden sind. Die weiteren Ursachen, die zu einem großen Dunkelstrom führen können, sind zu suchen a) in einer Feldemission der Elektroden, b) in einer Bildung von Ionen, wenn nicht ein äußerst gutes Vakuum vorhanden ist, und c) nicht zuletzt in einer schlechten Isolation. Die letzten drei Ursachen lassen sich durch geeignete Konstruktion der Vervielfacher hinreichend beseitigen, während eine Herabsetzung der thermischen Emission am sichersten durch Kühlung der Vervielfacher erfolgen

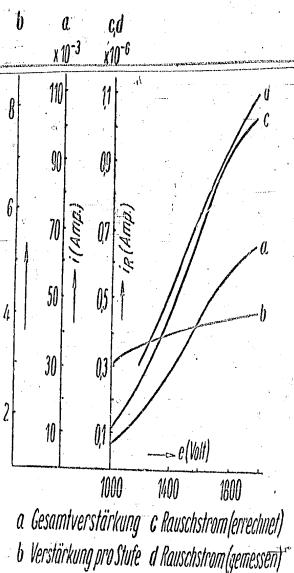


Abb. 110. Verstärkung und Rauschen eines 8-stufigen Vervielfachers.

kann. Technische Einrichtungen, um mit Vervielfachern im gekühlten Zustande zu messen, sind bereits bekannt geworden²⁶⁴).

Wie schon in IX, § 1b erwähnt ist, stellen die Zellen für die astronomische Photometrie die größten Anforderungen an die Herstellung und Konstruktion auch von Vervielfachern. Während das Verhältnis Signal/Rauschen bei gleichen Betriebsbedingungen kaum Schwankungen unterworfen ist, kann sich der Dunkelstrom nach Anlegen der Spannung zeitlich ändern²⁶⁵), meist in dem Sinne, daß er in der Zeit von zwei oder mehreren Stunden kleiner wird und alsdann einen konstanten Endwert annimmt.

e) Rauschverhältnisse der Widerstandszellen

Die Rauschursachen der Widerstandszellen sollte man in zwei Gruppen teilen, einmal in die Gruppe der Schwankungen des Dunkelstromes und zum anderen in die Gruppe der Schwankungen des lichtelektrischen Stromes. Die erste Gruppe enthält als Rauschursachen das Widerstandrauschen (nach NYQUIST), wegen der Lebensdauer positiver Löcher oder von Störstellenresten das Halbleiterrauschen, wegen des Übertritts der Dunkelleitfähigkeitselektronen von Kristallit zu Kristallit das Kristallrauschen, wegen der Ausbildung besonderer Randschichtverhältnisse an der Berührungsstelle Halbleiter-Metall das Randschichtrauschen und wegen der Unschärfe der Metallelektronen das Elektrodenrauschen, während die zweite Gruppe Rauschursachen enthält, die durch statistische Übergänge der lichtelektrischen Elektronen in die Leitfähigkeitsbänder und durch die sich wegen der Dunkelrauschoßspannung fortgesetzt ändernden Zellenvorspannung hervorgerufen werden.

Außer dem Widerstandrauschen sind alle anderen Rauschursachen als abhängig von der an den Elektroden der Widerstandszelle liegenden Vorspannung anzunehmen. Beim Fehlen der Vorspannung kann man daher ein Rauschen gemäß der Formel (79) [bzw. (79a)] erwarten. Die experimentellen Befunde zeigen in der Tat, daß ohne Vorspannung das reine NYQUISTRAUSCHEN angesetzt werden darf. Die theoretischen Ansätze gehen auch davon aus²⁶⁶). Die Übereinstimmung der experimentell gefundenen Werte mit den theoretischen läßt immer mehr zu wünschen übrig, je höher die angelegte Vorspannung gewählt wird.

Diese Tatsache ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, daß die erwähnten theoretischen Ableitungen die Rauschursachen bei Widerstandszellen außer dem Nyquistrauschen nicht hinreichend mathematisch fassen. Was allein den Betrag des Randschichtrauschen betrifft, so darf man ihn sicher nicht vernachlässigen, nachdem, wie in X, § 2g gezeigt ist, die Ausbildung von Randschichten in einer Größenordnung liegt, die die Erklärung reversibler Ermüdungserscheinungen nahelegt. MATARÉ²⁶⁷) aber hat für Randschichten ein Gesetz der statistischen Schwankungen aufgestellt (vgl. X, § 5 f), welches demnach auch für die an Widerstandszellen auftretenden Randschichten Gültigkeit haben muß.

Experimentell läßt sich aussagen, daß sich für jede Widerstandszelle eine charakteristische Vorspannung e_{ch} angeben läßt, oberhalb der für jede Zellenvorspannung $e_z > e_{ch}$ ein Ansteigen der Rauschspannung beobachtet wird. Wird $e_z = e_k$, wobei $e_k > e_{ch}$ ist und e_k als kritische Zellenvorspannung bezeichnet werden soll, so zeigt das Rauschen starke Rauschspannungsspitzen vom mehrfachen Betrage des mittleren Rauschwertes. Das Betreiben eines Photowiderstandes mit einer Vorspannung $> e_k$ bedingt mit Sicherheit eine Verkürzung der Lebensdauer, wenn nicht gar einen Durchschlag, der die sofortige Vernichtung der lichtempfindlichen Eigenschaften der Zelle nach sich zieht.

Nicht vernachlässigbar sind, wie GÖRLICH ebenfalls feststellte, auch Störungserhöhungen, die sich wie Rauscherhöhungen auswirken, wenn die Schichten in einer solchen Weise periodisch oder nichtperiodisch deformiert werden, daß die Deformation Zug- oder Druckbeanspruchungen in den Schichten hervorrufen. Mit abnehmender Temperatur der Schichten wird der Effekt größer. Die Erklärung dafür kann gegeben werden, wenn man berücksichtigt, daß gewisse Halbleiterschichten, wie z. B. Schichten aus SnSe, Bi₂Se₃, Cu₂S und PbS, eine Änderung ihres elektrischen Widerstandes bei Druck- und Zugbeanspruchung zeigen²⁶⁸).

Besonderes Interesse hat der Nachweis geringster Strahlungsintensitäten im Gebiet von 1 bis 6 μ gewonnen, d. h. ein Gebiet, welches mit Hilfe der PbS-Widerstandszelle (VI, § 6a, b) bzw. der PbSe- und PbTe-Widerstandszelle (VI, § 6c) erschlossen worden ist. Daher in-

teressieren auch die praktisch gemessenen Werte des Rausches solcher Zellen insbesondere in Abhängigkeit von der Unterbrecherfrequenz. Für PbS-Widerstandszellen hat HARRIS²⁶⁹⁾ Unterlagen veröffentlicht. Das für die Grenze des Nachweises kleinster Strahlungsintensitäten so entscheidende Signal/Rausch-Verhältnis, wird bei den Ultrawiderstandszellen im gekühlten Zustande der Schicht durch die Umgebungsstrahlung stark beeinflußt. WATTS hat gezeigt²⁴⁶⁾, daß unter Ausschaltung der Umgebungsstrahlung (vgl. X, § 3c) ein viel günstigeres Verhältnis Signal/Rausch erzielt werden kann.

f) Rauschverhältnisse der Sperrsichtzellen

Die diodenähnliche Charakteristik der Sperrsichtzellen (vgl. X, § 1g) legt es nahe, in Analogie zwischen Randschicht und Diode ein Gesetz für das Rauschspannungsquadrat der Sperrsichtzellen abzuleiten. Allgemein für Gleichrichter ist MATARI²⁶⁷⁾ diesen Weg gegangen. Wie in II, § 5d gesagt ist, entsteht die Randschicht durch Verarmung an Ladungsträgern an der Berührungsstelle zwischen Metall und Halbleiter. In der Randschicht des Halbleiters können sich Raumladungen und ein elektrisches Potential ausbilden, wie in Dioden. Der Unterschied zwischen beiden, Randschicht und Diode, ist durch in Serie und parallel zur Randschicht liegende Verlustwiderstände gegeben. Ausgangspunkt der Betrachtungen sind die ohne großen Fehler anzusetzenden beiden Äste der Kennlinie

$$i_j = K e^n + \sigma e \text{ (in Flußrichtung) und} \quad (85')$$

$$i_s = \sigma e \text{ (in Sperrrichtung),} \quad (85'')$$

wenn $\sigma = 1/R_q$ den Querleitwert darstellt. Als Ergebnis läßt sich eine Formel angeben, die der NYQUIST-Formel ähnelt:

$$e_{Sp}^{-2} = 4 k \frac{1 + 20 (|i| R_q - \sqrt{4 k T_0 R_q A \nu}) F^2 R_q S}{(1 + S R_q)^2} T_0 R_q A \nu, \quad (85''')$$

worin S die Steilheit bedeutet.

Es mag darauf hingewiesen sein, daß die Sperrsichtzellen im allgemeinen für Gleichlichtmessungen in Verbindung mit Galvanometern Benutzung finden und daher die untere Nachweigrenze oft durch das Galvanometer festgelegt wird (vgl. auch X, § 5b, letzter Absatz).

§ 6. Zusammenfassung der wichtigsten Zellendaten

Eingangs des Abschnittes X wurde auf die Schwierigkeit hingewiesen, die die Bildung einer „Gütezahl“ zur Charakterisierung der Photozelle in sich birgt. Man muß, wenn die richtige Zelle gewählt werden soll, wie eingangs des Abschnittes X ebenfalls erwähnt ist, alle Zelleneigenschaften betrachten und für eine Anwendung die Zelle aussuchen, deren Eigenschaften dem Anwendungszweck am besten dienen. Man sollte daher, wie es kürzlich von einigen Photozellenfachleuten vorgeschlagen worden ist, einen Bewertungsbogen einführen, der die wichtigsten Eigenschaften der Zelle erfaßt und das Aussuchen der richtigen Zelle erleichtert. Neben einigen nützlichen Angaben, beispielsweise dem Meßdatum, dem Hersteller, der Zellentyp und -type, der Fabrikationsnummer, dem Herstellungsdatum, den Flächenabmessungen, der Betriebstemperatur und dem Fensterwerkstoff, sollten die kennzeichnenden Angaben stehen. Darunter fallen Innenwiderstand, Betriebsspannung, Nutzen (in Volt_{eff}/Watt, an Stelle des Begriffes der Empfindlichkeit) für eine festzulegende Temperatur des Strahlers, Schwellwert (in Watt, d. i. diejenige Nachweisenergie, die einen dem Störpegel entsprechenden Ausschlag hervorruft), spezifischer Schwellwert (in Watt/cm²), Rauschspannung und Schwellwert bei zusätzlichem Störgleichlicht. Die Frequenzabhängigkeit und die Proportionalität lassen sich fassen, wenn man etwa als Grenze einen festgesetzten Abfall des Nutzens festlegt.

XI. Abschnitt

Lichtzähler

Der Abschnitt X, § 5b bis d läßt in Verbindung mit den Angaben in Abschnitt IX die Bestimmung der unteren Nachweisgrenze für technische Photozellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt zu. Unter Anwendung aller Vorsichtsmaßregeln dürfte die Grenze bei $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ erg cm $^{-2}$ sek $^{-1}$ erreicht sein (Größenordnung 10^6 Quanten cm $^{-2}$ sek $^{-1}$). Betreibt man jedoch gasgefüllte Zellen mit einer Vorspannung nahe der Glimmspannung (ELSTER und GEITEL), so daß der kontinuierliche Ausschlag bereits in einzelne Stromstöße ausartet, deren Zahl offenbar der einfallenden Intensität proportional ist, kann die Nachweisgrenze bis zu $\sim 3 \cdot 10^{-9}$ erg cm $^{-2}$ sek $^{-1}$ herabgesetzt werden (Größenordnung 10^3 Quanten cm $^{-2}$ sek $^{-1}$). Allerdings kann hierbei von einer leichten Handhabung der Meßanordnung nicht mehr die Rede sein. Vergleichsweise sei angeführt, daß das menschliche Auge im Maximum der Empfindlichkeitskurve auf $\sim 1 \cdot 10^{-9}$ erg cm $^{-2}$ sek $^{-1}$ anspricht.

Will man Lichtintensitäten $< 10^{-9}$ erg cm $^{-2}$ sek $^{-1}$ mit Sicherheit messen, so müssen andere Wege eingeschlagen werden. Einen Hinweis bietet der erwähnte ELSTER-GEITELSche Versuch, nach welchem eine gasgefüllte Photozelle in der Nähe der Glimmspannung betrieben wird. Zwangsläufig wird man dadurch zum Lichtzähler²⁷⁰ (auch Lichtquantenzähler genannt) geführt, der aus den Zählertypen entstand, die zur Zählung bewegter Elementarteilchen im wesentlichen von GEIGER entwickelt worden sind.

Man unterscheidet Zählrohre und Spitzenzähler, die entweder als Proportionalitäts- oder als Auslösezähler arbeiten. Ein GEIGER-MÜLLER-Zählrohr in technischer Ausführung²⁷¹ zeigt die Abb. 111. In der Achse eines zylindrischen Metallrohres MZ (Länge bis 30 cm, Durchmesser 2 bis 3 cm), welches entweder als Außenwand selbst dient oder sich, wie in der Abbildung angegeben, in einem Glasrohr

befindet, wird ein Draht, der Zähldraht Zd, aus Ni, Fe, Pt, Al, W oder oxydiertem Ni, gespannt. Der Zähldrahdurchmesser beträgt 0,1 bis 0,2 mm. Als notwendige Gasfüllung dient meist Ar mit einem Druck



Abb. 111. Technisches Geiger-Müller-Zählrohr.

von 50 bis 100 mm Hg. Nach neueren Untersuchungen erweist sich der Zusatz von Alkoholdampf (5 bis 10 mm Hg) als vorteilhaft²⁷². Die notwendige Betriebsspannung liegt knapp über 1000 V. In den meisten Fällen wird der Zähldraht positiv vorgespannt. Der in der Zählrohrsitzung (Abb. 112) eingetragene Widerstand R_1 beträgt

$\sim 10^9$ Ohm, R_2 hingegen 10^6 bis 10^7

Ohm. An Stelle des Fadenelektrometers

E kann auch ein Röhrenverstärker angeschlossen werden. Beim Durch-

gang eines ionisierenden Strahles oder

Teilchens werden zunächst ein oder

mehrere Ionenpaare entstehen. Sind die

Spannungen klein, so erhält man einen

kleinen Ionisationsstromstoß, weil die

Ionen aus dem Gas nach den Elektro-

den zu wandern. Liegen größere Span-

nungen am Zählrohr, so werden die Elektronen in der Nähe des positi-

tiven Zähldrahtes, also im stärksten Feld, neue Ionen durch Stoß

hervorrufen. Auf diese Weise tritt eine Verstärkung des Ionenstromes

ein. Die Größe der jeweiligen Ausschläge ist proportional der Zahl der

primär entstandenen Ionen. Solange man im Proportionalbereich

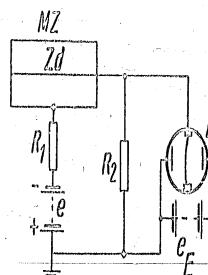
arbeitet, spricht man von einem Proportionalzähler. Dem Proportionalbereich folgt der Auslösbereich, in welchem die primäre Ionisa-

tion zur Auslösung einer kurzdauernden Koronaentladung führt

(Auslösezähler). Die Intensität des Entladungsstoßes im Auslöse-

bereich ist nicht mehr von der Zahl der primär entstandenen Ionen

abhängig. Demzufolge können im Auslösbereich auch keine Rück-

Abb. 112
Zählrohrsitzung.

schlüsse auf die einfallende Strahlung gezogen werden. Jedes Strahlungsteilchen löst im Auslösebereich einen Stromstoß aus. Die Bedingung ist nun, daß die Entladung möglichst rasch wieder unterdrückt wird, um das Zählrohr für den nächsten Entladungsstoß bereit zu halten. Durch den Spannungsabfall an R_1 beim Durchgang der Entladung sinkt die Spannung am Zählrohr, so daß die Entladung abreißen muß. Die Zeitdauer des Wiederanstieges der Spannung, die abhängig von der Kapazität und vom Widerstand ist, und die Zeitdauer der Entladung selbst geben in der Summe eine Zeit, während der das Zählrohr nicht arbeitsbereit ist. Das Abreißen der Entladung wird jedoch nicht allein durch den Widerstand besorgt, sondern auch von der die Feldstärke herabsetzenden positiven Raumladung, welche wird. Werden schwerere Gase verwendet, so bewegt sich die Raumladung langsamer, die Ionisationsmöglichkeit wird geringer. Auf dieser Wirkung der großen Alkoholmoleküle beruht offenbar der Vorteil, den die mit Alkoholzusatz versehenen Zählrohre bieten. Während bei Zählrohren ohne Alkoholzusatz die selbständige Entladung im wesentlichen durch den hohen Widerstand unselbstständig wird, ist die Entladung im Zählrohr mit Alkoholzusatz von vornherein unselbstständig.

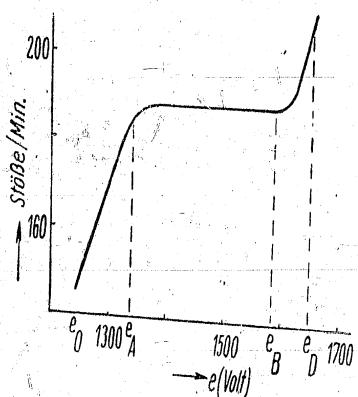


Abb. 113. Zählrohrecharakteristik.

Das Auflösungsvermögen der Zähler, d. h. die Zeit, in der sich gerade noch zwei nachzuweisende Elektronen voneinander unterscheiden lassen, liegt normalerweise in der Größenordnung 10^{-2} bis 10^{-4} sec. Die

Strom-Spannungscharakteristik eines Auslösezählers (vgl. Abb. 113) zeigt, daß erst oberhalb der Einsatzspannung e_0 einzelne Entladungsstöße auftreten. Bis zur Spannung e_A nimmt die Zahl der Entladungsstöße in der Zeiteinheit rasch zu, um im Spannungsbereich zwischen e_A und e_B konstant zu bleiben. Dieser Bereich wird der Spannungsbereich oder der Zählbereich des Zählrohres genannt. Oberhalb der Spannung e_D tritt eine Dauerentladung ein. Die Zahl der Entladungen pro Zeiteinheit im Zählbereich ist ein Maß für die ins Zählrohr einfallende Strahlung.

Jeder Zähler zeigt einen unvermeidbaren Nulleffekt, der durch die Radioaktivität und durch die kosmische Ultrastrahlung hervorgerufen wird. Je größer nun das Zählvolumen ist, d. h. die Größe des Volumens, welches ein Teilchen durchlaufen muß, um den Zähler zum Ansprechen zu bringen, um so größer wird auch der Nulleffekt. Ein extrem kleines Zählvolumen kann beim Spitzenzähler erreicht werden, und zwar von etwa 20 cm^3 bis herab zu 1 cm^3 . Will man stark gebündelte Strahlung untersuchen, so wird man mit Vorteil den Spitzenzähler anwenden, um den Nulleffekt niedrig zu halten, bei ausgedehnten Strahlenbündeln hingegen das Zählrohr. Der Spitzenzähler, der auf Versuche von GEIGER und RUTHERFORD zurückgeht, hat etwa die Gestalt, wie in Abb. 114 gezeigt ist. Ein Metallrohr (MZ) (Durchmesser 3 bis 4 cm) mit einer Eintritts-

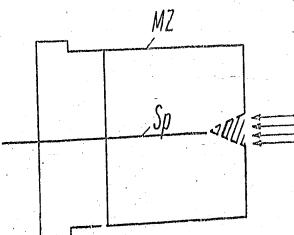


Abb. 114. Spitzenzähler.

öffnung für die Strahlung enthält axial einen isolierten Draht (Sp), der etwa 1 bis 2 cm vor der Eintrittsöffnung des Rohres endet. Man verwendet zweckmäßig einen Pt-Draht mit einem Kugelchen am Ende, welches 0,1 bis 0,2 mm Durchmesser besitzt. Metallrohr und Draht sind besonders dann, wenn der Zähler als Lichtzähler arbeiten soll, in einem verschmolzenen Glasrohr angeordnet. Die anzulegende Spannung richtet sich nach Gasdruck, Gasart und Durchmesser der Spitze. Wieder wird in den meisten Fällen mit negativer Gehäusespannung gearbeitet, und wieder muß zwischen Proportional- und Aus-

Gleich, Die lichtelektrischen Zellen

lösezähler unterschieden werden. Im Falle positiver Gehäusespannung wirkt der Zähler nur als Auslösezähler. Der schraffierte Teil vor der Spitze in der Abb. 114 stellt das Zählvolumen dar.

Der Nulleffekt, der sich durch eine gewisse Dunkelstoßzahl bemerkbar macht, muß genügend klein gegen den Meßeffekt sein. Ist n_0 die Zahl der Dunkelstöße in der Zeiteinheit und n die Zahl der Stöße, herrührend vom Meßeffekt, ebenfalls in der Zeiteinheit, so werden in der Zeit t vom Zähler $(n + n_0) t$ Stöße festgestellt. Ein gesichertes Resultat ist dann gegeben, wenn

$$nt \geq 3 \sqrt{(n + n_0)t} \quad (86)$$

erfüllt ist.

Durch die Anwendung der Zähler als Lichtzähler entstehen eine Reihe von Problemen, insbesondere dann, wenn der Lichtzähler im sichtbaren Spektralbereich arbeiten soll. Beim Zählrohr werden lichtelektrisch Elektronen am Metallzylinder (negative Gehäusespannung) oder am Zähldraht [positive Gehäusespannung²⁷³], beim Spitzenzähler an der Stirnwand (negative Gehäusespannung) ausgelöst. Die Vorteile, die die Lichtzähler den Photozellen gegenüber bieten, liegen darin, a) daß sich die Empfindlichkeitsgrenze zu $\sim 9 \cdot 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sek}^{-1}$ ergibt, b) daß eine beliebig lange Belichtungszeit möglich ist, durch die die Meßgenauigkeit erheblich erhöht werden kann, und daß c) jedes einzelne Elektron registriert wird, während die Photozelle nur eine Summe von Elektronen nachzuweisen vermag. Solange lediglich ultraviolettes Licht nachgewiesen werden soll, sind die Schwierigkeiten leicht zu überwinden²⁷⁴, wenn auch mit Nachwirkungseffekten an UV-empfindlichen Zählrohren gerechnet werden muß²⁷⁵. Man kann ein Zählrohr mit Quarzenfenster ausrüsten und den Metallzylinder für den Einfall der Strahlung durchbohren. Als Kathodenmaterial für das Gebiet zwischen 200 und 300 $\text{m}\mu$ wird Fe, Al, Ag, Zn und Cu und für das Gebiet bis 400 $\text{m}\mu$ Cd, Mg, Be und Ca (vgl. Tab. 3, IV, § 2b) verwendet. Im sichtbaren Spektralbereich können als Kathodenmaterial aus bekannten Gründen nur die Alkalimetalle in Betracht kommen. Die Schwierigkeiten, die bei Zählern für das sichtbare Spektralgebiet auftreten, liegen besonders in der erhöhten Dunkelstoßzahl. Die Erhöhung der Dunkelstoßzahl dürfte ihre Ursache in der Emission von

thermischen Elektronen, in der Emission von β - und γ -Strahlen der Alkalimetalle und in der Erhöhung der Rückzündwahrscheinlichkeit durch die kleinere Austrittsarbeit der Metalle haben²⁷⁶). Unter Rückzündwahrscheinlichkeit versteht man eine Art Selbsterregung des Zählers. Es werden Entladungen beobachtet, die durch vorangegangene Stromübergänge entstehen und zahlreicher werden, wenn die Spannung oder das Auflösungsvermögen erhöht werden.

Die Stabilisierung der Zählrohre mit Alkalikathoden gelingt nicht, wenn man die übliche Konstruktion verwendet. Offenbar ist dafür eine Wechselwirkung zwischen dem Füllgas und der Alkalikathode, deren Gasbeladung schwankt, verantwortlich zu machen. Es können also nur neue Wege zum Ziel führen. Einmal kann man die erhaltenen lichtelektrisch ausgelösten Elektronen aus einem Vakuumraum durch ein LENARD-Fenster in das Zählrohr schießen²⁷⁷), und zum andern kann man die Elektronen durch ein feinmaschiges Netz in einen Spitzenzähler einlaufen lassen²⁷⁸). Beide Wege sind mit Erfolg beschritten worden. Größere Aussicht auf technische Verwirklichung scheint das erste Verfahren zu besitzen, weil bei diesem eine vollständige Trennung des Photozellenteiles vom Zählrohrteil durchgeführt ist. Von Interesse dürfte auch das Verhalten von Sb, Cs-Schichten in Lichtzählern sein. Durch die geringere thermische Emission wird wahrscheinlich eine Herabsetzung der Dunkelstoßzahl eintreten.

Auch die Frage nach der Ausbeute der Zähler birgt ihre Schwierigkeiten. Es gibt gute Gründe anzunehmen, daß die Ausbeute der Zähler geringer ist als die der Photozellen. Die Gasbeladung der Kathoden in den Zählern, die unvermeidbar ist, wird sich sicher ungünstig auf den lichtelektrischen Effekt auswirken, vor allem, wenn mit Dampfzusätzen gearbeitet wird. Außerdem ist das Feld im Zähler inhomogen: Um den Zähldraht oder um die Spitze konzentriert sich das Feld außerordentlich, während an der Kathode nur geringe Feldstärken herrschen, so daß ein Teil der austretenden Elektronen auf die Kathode zurückfällt, ehe die Elektronen die zur Ionisation notwendige Energie erlangt haben. Messungen der Ausbeute von Lichtzählern mit aufgedampfter Cd-Kathodesind als Beispiel in der Abb. 115 wiedergegeben²⁷⁹).

Erwähnenswert ist neben dem Zählrohr und dem Spitzenzähler noch der Funkenzähler²⁸⁰). Er beruht auf der Tatsache, daß ein Teilchen, wenn es an die Stelle des kleinsten Abstandes genügend hoch geladener

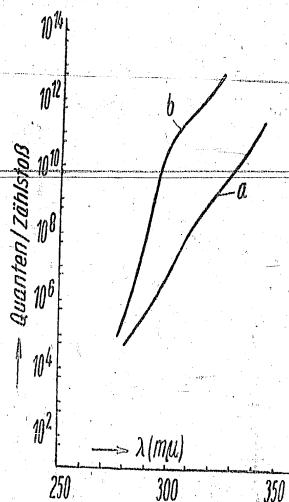


Abb. 115. Quantenausbeute von Lichtzählern a) Cd-Lichtzähler 12 mm Wasserdampf und b) 12 mm feuchte Luft.

satz zu GÖRLICH²⁸²), der sie zwischen 203 und 204 $\text{m}\mu$ durch Einzelbelichtung fand. Die GREINACHERSche Methode hat den Vorteil größerer Empfindlichkeit, kann aber andererseits im Schumamengebiet ($< 210 \text{ m}\mu$) nicht benutzt werden, weil unterhalb 210 $\text{m}\mu$ die Absorption der Luft schon zu groß ist. Man kann sich jedoch neben der Verwendbarkeit des Funkenzählers für die Forschung auch eine technische Ausführungsform denken, und zwar in Verbindung mit ammoniakalischen Lösungen, die im gekühlten Zustand (-78°C) eine langwellige Grenze zwischen 700 und 900 $\text{m}\mu$ besitzen²⁸³.

Die Lichtzähler haben sich bisher in der Technik noch nicht voll durchgesetzt. Der Grund mag vor allem darin zu suchen sein, daß der Meßbereich durch die bequemer zu handhabenden Vervielfacher der Photozelle gegenüber erweitert und dadurch das Bedürfnis nach Lichtzählern geschrämt wurde²⁸⁴.

Elektroden kommt, einen Funken auslöst. Bedeutung für lichtelektrische Untersuchungen kann der Funkenzähler erlangen, wenn die Untersuchung des lichtelektrischen Effektes an Flüssigkeiten in größerem Umfang als bisher durchgeführt werden sollte. Daß man mit Hilfe des Funkenzählers in der Tat Vorteile bei der Messung des äußeren lichtelektrischen Effektes erzielen kann, beweisen die Ergebnisse von JEANGUENIN²⁸¹), der die langwellige Grenze des Wassers zu 250 $\text{m}\mu$ bestimmen konnte, im Gegensatz zu GÖRLICH²⁸²), der sie zwischen 203 und 204 $\text{m}\mu$ durch Einzelbelichtung fand. Die GREINACHERSche Methode hat den Vorteil größerer Empfindlichkeit, kann aber andererseits im Schumamengebiet ($< 210 \text{ m}\mu$) nicht benutzt werden, weil unterhalb 210 $\text{m}\mu$ die Absorption der Luft schon zu groß ist. Man kann sich jedoch neben der Verwendbarkeit des Funkenzählers für die Forschung auch eine technische Ausführungsform denken, und zwar in Verbindung mit ammoniakalischen Lösungen, die im gekühlten Zustand (-78°C) eine langwellige Grenze zwischen 700 und 900 $\text{m}\mu$ besitzen²⁸³.

Die Ergebnisse von JEANGUENIN²⁸¹ bestätigen die Ergebnisse von

XII. Abschnitt

Anhang

3.1. Geschichtliche Angaben über die lichtelektrischen Effekte

1839	BEQUEREL	beobachtet das Auftreten einer Potentialdifferenz bei Belichtung zweier in einen Elektrolyten getauchter Elektroden.
1873	SMITH	stellt bei Versuchen, Selen als Hochohmwiderrand in Kabelschaltungen zu verwenden, die Lichtempfindlichkeit des Selenis fest.
1875	SIEMENS	konstruiert die erste Selenwiderrandszelle.
1876	ADAMS und DAY	berichten über das Auftreten einer selbständigen EMK bei Belichtung eines Selenstabes.
1878	SABINE	stellt elektrolytische Selenzellen her.
1883	FRIEDRICH	findet wie ADAMS und DAY, jedoch an einer mit durchscheinendem Blattgold bedeckten Selenfläche, bei Belichtung das Auftreten einer selbständigen EMK.
1887	HERTZ	findet bei Untersuchungen über die Resonanz elektrischer Schwingungen, daß die Schlagweite einer Funkenentladung durch Bestrahlung der Elektroden mit ultraviolettem Licht beeinflußt wird.
1887/88	HALLWACHS	entdeckt in Fortführung der HERTZSchen Versuche, daß sich Metalle unter Einwirkung ultravioletten Lichtes positiv aufladen (Grundversuch zum äußeren lichtelektrischen Effekt).
1889	STOLETOW	beweist die Trägheitslosigkeit des äußeren lichtelektrischen Effektes.
1890	ELSTER u. GEITEL	zeigen, daß der äußere lichtelektrische Effekt der einfallenden Lichtintensität proportional ist und daß die lichtelektrische Wirkung von einer für jeden Stoff charakteristischen langwelligen Grenze nach kürzeren Wellen hin zunimmt. Sie verwenden erstmals Alkalimetallkathoden in evakuierten Gefäßen.
	STOLETOW	findet, daß die lichtelektrische Ausbeute in Abhängigkeit vom Gasdruck in der Zelle (äußerer lichtelektrischer Effekt) über ein Maximum geht.

1899 LENARD

beweist für den äußeren lichtelektrischen Effekt:
 1. daß beim Belichten der Oberfläche Elektronen austreten, 2. daß die austretenden Elektronen eine Anfangsgennergie bis zu einigen Volt besitzen und 3. daß die Anfangsgennergie unabhängig von der Intensität, jedoch abhängig von der Frequenz des eingestrahlten Lichtes ist.

1901 BOSE

läßt sich den Lichtdetektor durch ein USA.-Patent schützen.

1902 AUSTIN u. STARKE

entdecken die Sekundärelektronenemission.

1905 EINSTEIN

findet auf Grund der LENARDSchen Versuchsergebnisse die Gleichung $h\nu = \frac{m}{2} v^2 + e\varphi$.

1906 DEMBER

verwendet zur Gasfüllung der Photozellen Edelgase (Argon, Helium).

1907 PRINGSHEIM

beobachtet stoßweise Entladung einer Spalte, die nahe dem Entladepotential gehalten ist, durch Belichtung mit ultraviolettem Licht.

1910 ELSTER u. GEITEL

führen die lichtelektrische Zelle (äußerer lichtelektrischer Effekt) als Vakuum- und als gasgefüllte Zelle in die Meßtechnik ein. Sie stellen die ersten Kaliumhydridzellen her.

1912 COMPTON u. RICHARDSON

bestimmen aus lichtelektrischen Messungen die Kontaktpotentialdifferenz zweier Metalle.

1913 GERLACH u. MEYER

verwenden den von MILLIKAN und EHRENHAIK angegebenen Schwebekondensator, um den lichtelektrischen Grundvorgang, das Ablösen von Elektronen, zu beobachten.

1916 MILLIKAN

weist experimentell die Gültigkeit der Beziehung $h\nu = \frac{m}{2} v^2 + e\varphi$ nach.

1917 CASE

entdeckt die Ultrarotempfindlichkeit von Widerstandszellen, die aus Thalliumsulfid, welches mit Sauerstoff behandelt ist, hergestellt sind.

1921 GUDDEN u. POHL

beweisen für den inneren lichtelektrischen Effekt 1. daß der lichtelektrische Primärstrom der absorbierten Lichtintensität proportional ist und 2. daß er trägeheitslos der Belichtung folgt.

1924 GEIGER (F. H.)

schafft den Kupferoxydultrockengleichrichter und beobachtet bei Belichtung desselben das Auftreten einer selbständigen EMK.

IVES

stellt Photokathoden mit äußerem lichtelektrischen Effekt durch Aufbringen dünner Alkalischichten

auf Metallunterlagen her (Erniedrigung der Ausstrittsarbeit).

benutzen als Kathoden für den äußeren lichtelektrischen Effekt Alkalioxyd auf einer Metallunterlage, das mit einer monatomaren Alkalischicht bedeckt ist.

bestimmen mit Hilfe der Methode des zentralen Feldes die Energieverteilung der Photoelektronen. ist der Wiederentdecker der von ADAMS und DAY

(1876), FRITTS (1883) und GEIGER (1924) gefundenen Erscheinungen (Herstellung von Kupferoxydulhinterwand-Sperrschichtzellen).

beschreibt die Kupferoxydulvorderwand-Sperrschichtzellen.

verbessern durch Zusatz von Tellur zum Selen die Ultrarotempfindlichkeit der Widerstandszellen.

sensibilisieren im Anschluß an die KOLLERSchen Versuche die Alkalikathoden mit Schwefel, Selen und Tellur.

veröffentlicht seine Versuche mit Selen-Sperrschichtzellen.

weist das Auftreten einer selbständigen EMK an natürlichen Halbleitereinkristallen (Proustit, Cuprit u. a.) unter Belichtung nach, die ein solches Vorzeichen hat, daß die Elektronen in Richtung des Lichtes getrieben werden.

verwendet das GEIGER-MÜLLER-Zählrohr, nachdem er den Zylinder mit einer lichtempfindlichen Kathode ausrüstet, zur Zählung von Lichtquanten.

baut die ersten dynamischen Vervielfacher.

stellt Kathoden für den äußeren lichtelektrischen Effekt aus Legierungen eines Alkalimetalls mit einem Metall geringer Leitfähigkeit (etwa Bi, Sb) her und erzielt damit Quantenausbeuten bis zu 30%.

führt die ersten *L*, *T*, und magnetischen Vervielfacher aus.

beweisen, daß die Emissionszentren für die lichtelektrische und sekundäre Emission verschiedene sind.

stellen den Netzvervielfacher her.

klären durch Versuche an KH-KBr-Mischkristallen die Frage nach den Sekundärströmen beim inneren lichtelektrischen Effekt.

1938 KOLOMIJEZ

gibt die Herstellung von Thalliumsulfidsperrschichtzellen an.

MICHELSEN
1940 KUTZSCHER

verbessert den Lichtdetektor zur Bleiglanznetzzele. stellt serienmäßig die ersten mit Kohlensäureschnee gekühlten Bleisulfidwiderstandszeilen her.

1941 GUDDEN u. TREU

geben Vorschriften für die Herstellung von ungekühlten Bleisulfidwiderstandszeilen.

LOSKHAREW

berichtet über die ersten hochempfindlichen Silber-sulfidsperrschichtzellen.

1942 Görlich u. LANG

stellen serienmäßig die ersten ungekühlten Bleisul-fid-Widerstandszeilen her.

1944 GUDDEN u. FRANK

erzielen die ersten Erfolge mit hochohmigen, licht-empfindlichen Bleisulfidwiderstandsschichten,

GUDDEN und TREU

mit Bleiselenidwiderstandszeilen und

HERTZ u. KRENZEN

mit Bleiteluridwiderstandszeilen.

1946 FRERICHS

entdeckt die große Empfindlichkeit des inneren lichtelektrischen Effektes an Cadmiumsulfidkri-stallen und

Görlich

die des Cadmiumselenids.

Ergänzungen zu den Tabellen 16, 18, 19 und 20

Die Tabellen 16, 18, 19 und 20 zeigen nach Meinung des Verfassers auf, welche Firmen bzw. Werkstätten sich mit der Herstellung von Photozellen in den Jahren 1944/45 befaßten. Die Tabellen bedürfen naturgemäß einer laufenden Ergänzung.

Neue Firmen:

Name des Herstellers	Art der hergestellten Photozellen	Anwendungszweck	Besondere Kennzeichen
Physikalisch-Technische Werkstätten, Prof. Heimann, Wiesbaden	Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt	Tonfilm, technische und wissenschaftliche Anwendungen	Vakuumzellen und gasgefüllte Zellen mit Cäsiumoxydkathoden
Forschungs- und Entwicklungslaboratorium, Dr. G. Mauer, Kohlberg Kr. Nürtingen	Vervielfacher, acht- und elf-stufig	technische und wissenschaftliche Anwendungen	Cäsiumoxydkathoden

§ 2. Übersichtstafeln

Vergleichende Zusammenstellung der Empfindlichkeiten verschiedener lichtelektrischer Zellen

Zellenart	$S_i^{(a)}$	$S_e^{(a)}$	Langwellige Grenze	Quantenäquivalent	Anpassung	$S_{i\max}$	$S_{e\max}$
Cäsiumoxydzelle (Vakuum)	$20 - 45 \frac{\mu A}{lm}$	$5 \frac{V}{mm}$	$1300 \text{ m}\mu$	bis 1%	—	—	—
Cäsium-Antimonzelle (Vakuum)	$30 - 60 \frac{\mu A}{lm}$	$5 \frac{V}{mm}$	$800 \text{ m}\mu$	bis 30%	—	—	für $R_c = R_i$
Cäsiumoxydvervielfacher	bis 20 $\frac{A}{lm}$	$10^4 \frac{V}{mm}$	$1300 \text{ m}\mu$	bis 1%	—	—	—
Selenwiderstandszelle	$100 - 3000 \frac{\mu A}{lm}$	$10 \frac{V}{mm}$	$900 \text{ m}\mu$	—	—	—	—
Thallioffidwiderstandszelle	$2000 - 3000 \frac{\mu A}{lm}$	$10 \frac{V}{mm}$	$1800 \text{ m}\mu$	—	—	—	—
Selensperrschichtzelle	$200 - 600 \frac{\mu A}{lm}$	$0,01 \frac{V}{mm}$	$800 \text{ m}\mu$	bis 50%	—	—	—
					—	—	für $R_c = \infty$

^(a) Für Alkalivakuumzellen und Vervielfacher ist $S_i = \text{konstant}$, ebenso für Sperrschichtzellen im Kurzschlußfall.

^(*) $T = 2360^\circ \text{K}$.

§ 4. Einzelliteratur

- 1) SCHRÖDINGER, R., Ann. Physik 81 (1926) 199.
- 2) WENTZEL, G., Z. Physik 40 (1926) 578; BECK, G., Z. Physik 41 (1927) 443.
- 3) Vgl. z.B. LIPSCHEITZ, J., und REGGIANI, M., Z. phys. Chemie 155 (1931) 431.
- 4) DEMBKE, H., Physik, Z. 32 (1931) 554, 856.
- 5) Zus. Darst. z.B. SMEKAL, A., Physik in regelm. Ber. 4 (1936) 17, 173, 193; 8 (1940) 127; MÖGLICH, P., und ROMPE, R., Physik in regelm. Ber. 10 (1942) 7, MASSAY, H. S. W., J. sci. Instr. 24 (1947) 220; SEITZ, F., J. appl. Physics 16 (1945) 553; MEYER, W., Z. Elektrochemie 50 (1944) 274; BUSCH, G., Z. angew. Math. u. Phys. 1 (1950) 3; RIEHL, N. u. SCHÖN, W., Z. Physik 114 (1939) 682.
- 6) SCHOTTKY, W., Z. Physik 14 (1923) 63.
- 7) MILLIKAN, R. A., Physic. Rev. 18 (1921) 236.
- 8) RICHARDSON, O. W., Philos. Mag. 24 (1912) 570; 27 (1914) 476.
- 9) FOWLER, R. H., Physic. Rev. 38 (1931) 45.
- 10) HILSCH, R., und POHL, R. W., Z. Physik 108 (1938) 55; POHL, R. W., und STÖCKMANN, F., Ann. Physik 1 (1947) 275.
- 11) FRERICHS, R., Naturwiss. 33 (1946) 281; Physic. Rev. 72 (1947) 594; BROSER, I., u. KALLMANN, H., Z. Naturforschg 2a (1947) 439, 642; FASSBENDER, J., MÖGLICH, F., u. ROMPE, R., Ann. Physik 3 (1948) 327; FASSBENDER, J., Ann. Physik 5 (1949) 33; FASSBENDER, J., u. LEHMANN, H., Ann. Physik 6 (1949) 215; BROSER, J., und WARMINSKY, R., Ann. Phys. 7 (1950) 289.
- 12) Eine Übersicht über die verschiedenen Theorien des Sperrsichtphotoeffektes gibt LANGE, B., Die Photoelemente und ihre Anwendung, 1. Teil, Kapitel II; Leipzig 1936.
- 13) VAN GEELEN, W., Z. Physik 69 (1931) 765.
- 14) MOTT, H. V., Proc. Roy. Soc. London 171 (1939) 27, 281.
- 15) Vgl. insbes. SCHOTTKY, W., Z. Physik 118 (1942) 539.
- 16) Vgl. ROTHE, H., und KLEEN, W., Grundlagen und Kennlinien der Elektronenröhren in „Bücherei der Hochfrequenztechnik“ (1940) 124.
- 17) FRÖHLICH, R., Ann. Phys. 13 (1932) 229; WOOLDRIDGE, D. E., Physic. Rev. 56 (1939) 562; neuere Überlegungen s. SCHLECHTWEG, H., Naturwiss. 31 (1943) 204; Techn. Mitt. Krupp Forschungsber. 6 (1943) 99.
- 18) NORDHEIM, L., Physik, Z. 30 (1929) 177.
- 19) SUHRMANN, R., Z. Physik 33 (1925) 63.
- 20) DU BRIDGE, L. A., Physic. Rev. 39 (1932) 108; BLOCHINZEW, D., Physik. Z. d. Sowj. 1 (1932) 781.
- 21) FRÖHLICH, H., Elektronentheorie der Metalle, Berlin 1936, S. 119; neuere theoretische Betrachtungen und Vergleiche mit anderwärts experimentell gewonnenen Ergebnissen vgl. FAN, Physic. Rev. 68 (1945) 43.
- 22) MAYER, H., Z. Physik 124 (1948) 326.
- 23) MARX, Physic. Rev. 69 (1946) 523.

§ 4. Einzelliteratur

- 24) ROTHE, F., und BOMKE, H., Z. Physik 86 (1933) 321.
- 25) NITSCHE, A., Ann. Physik 14 (1932) 463; UNDERWOOD, N., Physic. Rev. 47 (1935) 502; FARNSWORTH, H. E., und RALPH, P., Physic. Rev. 58 (1940) 812.
- 26) CARDWELL, A. B., Physic. Rev. 38 (1931) 2033.
- 27) SMOLUCHOWSKI, R., Physic. Rev. 60 (1941) 661.
- 28) Vgl. insbes. FRIEDRICH, W., und SCHULZE, R., Strahlentherapie 50 (1934) 386.
- 29) FLEISCHER, R., Ann. Physik 82 (1927) 75; auch WIEDMANN, G., Verh. dtsch. physik. Ges. 18 (1916) 333.
- 30) SUHRMANN, R., und SCHALLAMACH, A., Z. Physik 91 (1934) 775.
- 31) Beispiele für Untersuchungen an kompakten Metallen: GERDING, H., und GERDING-KROON, R., Rev. Trav. chim. 51 (1932) 612; HUNTER, J. S., Proc. Roy. Soc., EDINBURGH 54 (1934) 102; Philos. Mag. 19 (1935) 958; RENTSCHLER, H. C., und HENRY, D. E., J. Opt. Soc. Am. 26 (1936) 30; RINGER, K., Z. Physik 102 (1936) 156; Beispiele für Untersuchungen an Aufdampfschichten: CASHMAN, R., und HUXEFORD, W., Physic. Rev. 43 (1933) 811; DÉJARDIN, G., und SCHWEGLER, R., Compt. Rend. 196 (1933) 1585; DEVIE, C. F., Physic. Rev. 50 (1936) 481; CASHMAN, R. J., und HASSE, R., Physic. Rev. 53 (1938) 919; RENTSCHLER, H. C., und HENRY, D. E., Trans. Electrochem. Soc. 87 (1945).
- 32) Vgl. z.B. DU BRIDGE, L. A., und ROEHR, W. W., Physic. Rev. 39 (1932) 99.
- 33) BOMKE, H., Ann. Physik 10 (1931) 579; neuerdings sind die Untersuchungen, den Einfluß des Wasserdampfes betreffend, ausgedehnt worden auf die Metalle Zn, Sb und Na, vgl. REIMERT, L. J., J. Opt. Soc. Am. 36 (1946) 278.
- 34) THEIN, L. P., Physic. Rev. 53 (1938) 287.
- 35) HERTZ, H., Wiedemanns Ann. 31 (1887) 983; HALLWACHS, W., Wiedemanns Ann. 33 (1888) 301; neuere Untersuchungen siehe z.B. MACK, J. M., Physic. Rev. 58 (1940) 196.
- 36) Vgl. z.B. CLAUSSNITZER, J., Phys. Z. 34 (1933) 791; MIYOSTRI, Y., Electrot. J. Tokyo 4 (1940) 239.
- 37) KRAMER, J., Z. Physik 125 (1949) 755.
- 38) Vgl. z.B. SCHULZE, R., Physik. Z. 34 (1933) 24. Experimentelle Ergebnisse siehe z.B. FUKURO, T., Sc. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. Tokyo 32 (1937) 187; WEBER, A. H., Physic. Rev. 53 (1938) 895; und O'BRIEN, D. F., Physic. Rev. 60 (1941) 574.
- 39) GUDDEN, B., und POHL, R. W., Z. Physik 34 (1925) 245.
- 40) FLEISCHMANN, R., Göttinger Nachr. (1931) 252; HAGMANN, D., Soc. Roum. Phys. 40 (1939) 77. Über die Größe des Photostromes in Abhängigkeit von der Schiehdicke vgl. MACIUC, G., Soc. Roum. Phys. 40 (1939) 3, sowie MAYER, H., Z. Physik 124 (1948) 326, 345. In letzterer Arbeit wird die Konsequenz gezogen, nämlich technische Vielschichten-Photozellen herzustellen.
- 41) KRAMER, J., Z. Physik 106 (1937) 675, 692.

⁴²) Vgl. bes. LOVELL, A. C. B., Proc. Roy. Soc. 157 (1936) 311; APPLEYARD, E. T. S., und LOVELL, A. C. B., Proc. Physic. Soc. 49 (1937) 118; über Wachstum, Struktur und Leitfähigkeit dünner metallischer Schichten s. auch LEVINSTEIN, H., J. appl. Phys. 20 (1949) 306; HARRIS, L., und SHAFFER, L. H., Physic. Rev. 76 (1949) 943.

⁴³) FLEISCHER, R., und TEICHMANN, H., Die lichtelektrische Zelle und ihre Herstellung, Dresden und Leipzig, 1932, S. 47 ff.

⁴⁴) IVES, H. B., Astrophysic. J. 60 (1924) 209.

⁴⁵) SUHRMANN, R., und SCHALLAMACH, A., Z. Physik 79 (1932) 153; MAYER, H., Ann. Physik 29 (1937) 129; 33 (1938) 419.

⁴⁶) Weitere Einzelheiten über Absorptionsschichten (Ausbeute, spektrale Verteilung in Abhängigkeit von der Unterlage u. a.) vgl. z. B. FLEISCHER, R., Physik. Z. 32 (1931) 217; KEITH-BREWER, A., Physic. Rev. 44 (1933) 1016; ROLLER, D., und WOOLDRIDGE, D., Physic. Rev. 45 (1934) 119; BRADY, J. J., Physic. Rev. 47 (1935) 197; IVES, H. B., und BRIGGS, H. B., J. Opt. Soc. Am. 28 (1938) 330; MAYER, H., Z. Physik 115 (1940) 729.

⁴⁷) Ausführliche Darstellung bei DE BOER, J. H., Elektronenemission und Adsorptionerscheinungen, Leipzig, 1937 S. 96.

⁴⁸) STRANSKI, I. N., und SUHRMANN, R., Ann. Physik 1 (1947) 169.

⁴⁹) RENTSCHLER, H. C., und HENRY, D. E., Bull. Am. physic. Soc. 11 (1936) 26.

⁵⁰) GÖRLICH, P., Physik. Z. 43 (1942) 121.

⁵¹) ELSTER, J., und GEITEL, H., Physik. Z. 12 (1911) 609; POML, R. W., und PRINGSHEIM, P., Verh. dtsch. physik. Ges. 15 (1913) 179.

⁵²) DE BOER, J. R., Elektronenemission und Adsorptionerscheinungen, Leipzig 1937.

⁵³) FLEISCHER, R., Ann. Physik 82 (1927) 75.

⁵⁴) Vgl. z. B. BOSWORTH, R. C. L., Trans. Faraday Soc. 32 (1936) 1369; TYKOCINER, J. T., KUNZ, J., und GARDNER, L. P., Physic. Rev. 57 (1940) 565; TYKOCINER, J. T., und BLOOM, L. R., Physic. Rev. 57 (1940) 571; 59 (1941) 115.

⁵⁵) Zusammenfassende Darstellung vgl. FLEISCHER, R., und TEICHMANN, H., Die lichtelektrische Zelle und ihre Herstellung, Dresden u. Leipzig, 1932, insbes. S. 36; wichtige Einzeldarstellungen KOLLER, L. R., Physic. Rev. 29 (1927) 902 (Sauerstoff); OLPIN, A. R., Physic. Rev. 36 (1930) 258; KLUGE, W., Z. Physik 67 (1931) 497 (Schwefel, Selen, Tellur); SUHRMANN, R., Z. Elektrochem. 44 (1938) 484 (organische Substanzen).

⁵⁶) VERWEY, E. J. W., und DE BOER, J. R., Rec. trav. chim. 55 (1936) 675.

⁵⁷) KOLLER, L. R., Physic. Rev. 36 (1930) 1639; IVES, H. B., und OLPIN, A. R., J. Opt. Soc. Am. 24 (1934) 198.

⁵⁸) ASAO, S., Physics 2 (1932) 12.

⁵⁹) FLEISCHER, R., und GÖRLICH, P., Physik. Z. 35 (1934) 289.

⁶⁰) ASAO, S., Proc. physic. math. Soc. Japan 22 (1940) 448; theoretische Überlegungen vgl. SAYAMA, Y., J. Opt. Soc. Am. 39 (1949) 162.

§ 4. Einzelliteratur

⁶¹) KLUGE, W., Physik. Z. 34 (1933) 115; Z. Physik 95 (1935) 734.

⁶²) GÖRLICH, P., Z. Physik 116 (1940) 704.

⁶³) DE BOER, J. H., CUSTERS, J. F. H., und DIPPEL, C. J., Physica 1 (1934) 935; SUHRMANN, R., Z. Elektrochem. 44 (1938) 478; KLUGE, W., Z. techn. Physik 19 (1938) 597.

⁶⁴) HUGHES, A. L., und DU BRIDGE, L. A., Photoelectric Phenomena 1932; DE BOER, J. H., und TEVES, M. C., Z. Physik 83 (1933) 523; HARTMANN, W., Z. Fernseh GmbH. 1 (1939) 226; GÖRLICH, P., Z. Physik 116 (1940) 704; SUHRMANN, R., und DEHMELT, P. W., Z. Physik 118 (1942) 677; für Erdalkalioxydkathoden NISHIMORI, E., KAWAMURA, H., und HIRANO, K., Proc. physic. Math. Soc. Japan 23 (1941) 37.

⁶⁵) MORIYA, V., Electrotechn. J. Japan 1 (1937) 118; vgl. an neueren Untersuchungen FRIMMER, A. J., und SINITZKAYA, I. G., Vortr. Akad. Wiss. UdSSR 66 (1949) 49.

⁶⁶) UYEDA, R., ASAO, S., SAYAMA, Y., und KOBAYASHI, A., Proc. physic. math. Soc. Japan 22 (1940) 791; vgl. auch KLUGE, W., und RUPP, E., Physik. Z. 32 (1931) 165 (Elektronenreflexion an K-Hydridkathoden).

⁶⁷) GÖRLICH, P., Z. Physik 109 (1938) 374.

⁶⁸) TEICHMANN, H., Z. techn. Physik 19 (1938) 600; MAURER, G., Z. Physik 118 (1941) 104.

⁶⁹) BRAUER, G., Z. anorgan. Chemie 225 (1947) 101.

⁷⁰) Zusammenfassende Beschreibung und ausführliche Literaturangaben s. HARTMANN, W., Z. Fernseh GmbH. 2 (1943) 157.

⁷¹) JAMIESON, N. F., SHEA, T. E., und PIERCE, P. H., J. Soc. Mot. Pict. 27 (1936) 365.

⁷²) KLUGE, W., Z. Physik 93 (1935) 789.

⁷³) SCHÄTTI, N., Helv. Phys. Acta 23 (1950) 108.

⁷⁴) SCHÖLER, K., Feinmech. und Präzision 49 (1941) 1.

⁷⁵) GÖRLICH, P., Z. Physik 101 (1936) 335.

⁷⁶) MATTLER, J., Compt. Rend. 216 (1943) 760; 218 (1943) 143.

⁷⁷) GÖRLICH, P., Z. techn. Physik 18 (1937) 460.

⁷⁸) GÖRLICH, P., Philos. Mag. 25 (1938) 256; J. Opt. Soc. Am. 31 (1941) 504; Z. Physik 116 (1940) 704.

⁷⁹) SOMMER, A., Proc. Roy. Soc. 55 (1943) 145.

⁸⁰) GLOVER, A. M., und JONES, R. B., Electronics 13 (1940); RCA Rev. 6 (1941) 43.

⁸¹) SHUKOW, W. W., J. techn. Physik (russ.) 9 (1939) 376; MOROZOV, G., J. techn. Physik (russ.) 9 (1939) 2018.

⁸²) SAIZEFF, N., J. techn. Physik (russ.) 9 (1939) 661; SOMMER, A., Nature 148 (1941) 468.

⁸³) Vgl. u. a. RENDUS, H., Z. Physik 119 (1942) 265; GLOCKER, R., und RENDUS, H., Z. Elektrochemie 48 (1942) 327; ZINTL, R., und HARDER, A., Z. physik. Chemie (B) 16 (1932) 206.

⁸⁴) LEWIN, G., Trans. Electrochem. Soc. 87 (1945); BURTON, J. A., Physic. Rev. 72 (1947) 531; MENSCHIKOW, M. I., Z. techn. Physik (russ.) 17 (1947) 579; MORGULIS, N. D., BORSJAK, P. G., und DJATLOWITZKAJA, Nachr. Akad. Wiss. UdSSR. (Serie Physik) 12 (1948) 126.

⁸⁵) CHLEBNIKOW, N. S., und MELAMED, A. E., Z. techn. Physik (russ.) 14 (1944) 385; CHLEBNIKOW, N. S.; Z. techn. Physik (russ.) 16 (1946) 745; 17 (1947) 333.

⁸⁶) Die umfangreiche gesamte Literatur über Legierungskathoden ist zusammengefaßt bei GÖRLICH, P., Z. Physik 116 (1940) 704; Physik. Z. 43 (1942) 121; über einige interessante optische Besonderheiten an Legierungskathoden vgl. KARCHANINA, N. J., und MORGULIS, N. D., J. techn. Phys. (russ.) 20 (1950) 345.

⁸⁷) LOTMAR, W., Helv. Phys. Acta 18 (1945) 369.

⁸⁸) GÖRLICH, P., und LANG, W., Z. Instrumentenkde. 57 (1937) 249.

⁸⁹) GÖRLICH, P., und LAU, E., Z. Physik 77 (1932) 746.

⁹⁰) BECKER, K., Physik. Z. 32 (1931) 489; MICHAELSON, H. B., J. appl. Phys. 21 (1950) 536.

⁹¹) MROWKA, B., Z. techn. Physik 18 (1937) 572.

⁹²) BRÜCHE, E., und JOHANNSON, H., Physik. Z. 33 (1932) 898; FOX, G. W., und BAILEY, F. M., Physic. Rev. 2 (1941) 174.

⁹³) HUBER, H., und WAGENER, S., Z. techn. Physik 23 (1942) 1.

⁹⁴) HEINZE, W., und WAGENER, S., Z. techn. Physik 17 (1936) 645.

⁹⁵) BLEWETT, J. P., J. appl. Physics 10 (1939) 668, 831; zusammenfass. Lit. s. auch BLEWETT, J. P., J. appl. Physics 17 (1946) 643; FIELD, L. M., Rev. modern Physics 18 (1946) 353.

⁹⁶) REIMANN, A. L., und MURCOORI, R., Philos. Mag. 9 (1930) 440.

⁹⁷) KOLLER, L. R., Physic. Rev. 25 (1925) 671.

⁹⁸) Vgl. z.B. WAGNER, E. R., Electronics (1934) 104; LANGER, K., Feinmechanik u. Präz. 51 (1943) 53.

⁹⁹) KNOLL, M., und THEILE, R., Z. Physik 113 (1939) 260.

¹⁰⁰) FARNSWORTH, H. B., Physic. Rev. 27 (1926) 243; WOOLDRIDGE, D. E., Physic. Rev. 56 (1939) 562.

¹⁰¹) KOLLATH, R., Ann. Physik 33 (1938) 285.

¹⁰²) GÖRLICH, P., Physik. Z. 43 (1942) 121.

¹⁰³) Vgl. z.B. HASTINGS, A. E., Physic. Rev. 57 (1940) 695.

¹⁰⁴) SUHRMANN, R., und KUNDT, W., Z. Physik 121 (1943) 118; STAHL, H., und WAGNER, S., Z. techn. Physik 24 (1943) 286, glauben, aus ihren Untersuchungen schließen zu können, daß dünne aufgedampfte Be-Schichten durch Temperaturbehandlung über 700°C schwach oxydiert werden und daß auf diese Weise ein hohes δ erzielt wird.

¹⁰⁵) MÜLLER, H. O., Z. Physik 104 (1937) 475.

¹⁰⁶) SIXTUS, K., Ann. Physik 3 (1929) 1017.

§4. Einzelliteratur

257

¹⁰⁷) SALOW, G., Z. techn. Physik 21 (1940) 8; HEIMANN, W., und GEYER, K., Elektr. Nachr. Techn. 17 (1940) 1.

¹⁰⁸) FRIEDEMIR, J., und WEISS, G., Naturwiss. 29 (1941) 777; vgl. auch Ag, Mg-Legierung mit ca. 15% Mg. ZWORYKIN, V. K., RUEDY, J. E., und PIKE, E. W., J. appl. Physics 12 (1941) 696.

¹⁰⁹) GILLE, H., Z. techn. Physik 22 (1940) 228.

¹¹⁰) DJATLOWITZKAJA, B. J., Ber. Akad. Wiss. UdSSR. 63 (1948) 641.

¹¹¹) Zusammenfassende Darstellung vgl. BRUINIG, H., Die Sekundäremission fester Körper, Berlin, 1942; KNOLL, M., HACHENBERG, O., und RANDMER, J., Z. Physik 122 (1944) 137.

¹¹²) SCHNITGER, H., Z. techn. Physik 21 (1940) 376; TASULACHOFF, B. D., J. techn. Phys. (russ.) 20 (1950) 773.

¹¹³) BEAMS, J. W., Physic. Rev. 43 (1933) 781; HAEFER, R., Naturwiss. 27 (1939) 32; CHAMBOR, C. C., Physic. Rev. 43 (1933) 768; MÜLLER, E. W., Z. Physik 106 (1937) 541; BENJAMIN, M., und JENKINS, R. O., Proc. Roy. Soc. (A) 180 (1942) 225.

¹¹⁴) HENDERSON, J. E., und DAHLSTROM, R. K., Physic. Rev. 55 (1939) 473.

¹¹⁵) MALTER, L., Physic. Rev. 50 (1936) 48.

¹¹⁶) MÜHLENPFORDT, J., Z. Physik 108 (1938) 698; MAHL, R., Z. techn. Physik 18 (1937) 559.

¹¹⁷) PIORE, R. R., Physic. Rev. 51 (1937) 1111.

¹¹⁸) PAETOW, H., Z. Physik 117 (1941) 399.

¹¹⁹) TREY, F., Physik. Z. 44 (1943) 38.

¹²⁰) KYROPOULOS, S., Z. anorg. allg. Chemie 154 (1926) 308.

¹²¹) HILSCH, R., Ann. Physik 29 (1937) 407. An dieser Stelle ist auch die ältere Literatur zu finden.

¹²²) STASIĆ, O., und TELTOW, J., Nachr. Akad. Wiss. Göttingen (1941) 93, 100, 110; Ann. Physik 40 (1941) 181; für die Herstellung neuartiger Silberbromid-Emulsionen sind die Versuche von entscheidender Bedeutung geworden, vgl. STASIĆ, O., und TELTOW, J., Z. anorg. Chemie 257 (1948) 103, 109.

¹²³) Vgl. z. B. BARSCHEWSKY, B., Z. exper. und theor. Phys. (russ.) 16 (1946) 815; KOTLAREWSKY, A. B., Z. exper. und theor. Phys. (russ.) 17 (1947) 519; KIRILLOV, E. A., und LEVY, I. Z., Z. exper. und theor. Phys. (russ.) 17 (1947) 339; MITCHELL, J. W., Philos. Mag. 40 (1949) 249.

¹²⁴) STASIĆ, O., und TELTOW, J., Ann. Physik 1 (1947) 261.

¹²⁵) Vgl. z. B. SCHÖNWALD, B., Ann. Physik 15 (1932) 395.

¹²⁶) ENGELHARD, B., Ann. Physik 17 (1933) 501.

¹²⁷) PFUND, A. H., Physic. Rev. 7 (1916) 289; COBLENTZ, W. W., Bur. Stand. Sci. Pap. 18 (1922) 603.

¹²⁸) JUSÉ, W. P., und RYVKIN, S. M., Z. exper. u. theor. Physik (russ.) 20 (1950) 139.

¹²⁹) MÖNCH, G., Physik. Z. 40 (1939) 487; BECKER, A., und SCHAPER, J., Z. Physik 122 (1944) 49.

¹³⁰) MICHELSEN, F., Z. techn. Physik 11 (1930) 511.

Görlich, Die leitlektrischen Zellen

17

¹³¹) MOSS, T. S., Proc. Physic. Soc. A 62 (1949) 264.

¹³²) CASE, T. W., Physic. Rev. 15 (1920) 289; neuere Ergebnisse, insonderheit über die Oxydation des Tl_2S und der daraus folgende Leitungsmechanismus vgl. von HIPPEN, A., CHESLEY, F. G., DENMARK, H. S., ULIN, B. P., und RITTNER, E. S., J. Chem. Physics 14 (1946) 355, 370; Physic. Rev. 69 (1946) 685.

¹³³) SEWIG, R., Z. techn. Physik 11 (1930) 269.

¹³⁴) Vgl. z. B. PICK, H., Z. Physik 126 (1949) 12 (dort weitere Literatur).

¹³⁵) Bemerkungen zur Struktur von PbS-Aufdampfschichten s. FRANK, K., MÜLLER, TH., und RAITHEL, K., Optik 5 (1949) 197.

¹³⁶) Vgl. z. B. GUDDEN, B., Forschungsarbeiten über infrarote Strahlungsempfänger, Berlin 1944; CASHMAN, R. J., J. Opt. Soc. Am. 36 (1946) 356; KECK, P. H., Optik 1 (1946) 42; HEPNER, W. A., Nature 159 (1947) 96; STARKEWICZ, J., SOSNOWSKI, L., und SIMPSON, O., Nature 158 (1946) 28; interessant ist eine Mitteilung, nach welcher offenbar die Stelle von Sauerstoff auch durch Schwefel ersetzt werden kann, vgl. GIBSON, A. F., Nature 163 (1949) 321; weitere neuere Arbeiten über PbS: PICK, H., Ann. Physik 3 (1948) 255; PAKSWER, S., Electronics (1949) Mai S. 111; WATTS, B. N., Proc. Physic. Soc. 62 (1949) 456; über das Verhalten von PbS-Widerstandszellen im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich s. insbes. GENZEL, L., und MUSER, H., Z. Physik 127 (1950) 194.

¹³⁷) Vgl. GÖRLICH, P., Z. Naturforschg. 2a (1947) 47.

¹³⁸) WILMAN, H., Proc. Physic. Soc. 60 (1948) 117; systematische Untersuchungen über Struktur und Wachstum von PbS-Niederschlägen vgl. ELLEMAN, A. J., und WILMAN, H., Proc. Physic. Soc. 61 (1948) 164; 62 (1949) 344.

¹³⁹) SCHWARZ, E., Nature 162 (1948) 614.

¹⁴⁰) OXLEY, C. L., J. Opt. Soc. Am. 36 (1946) 356.

¹⁴¹) MOSS, T. S., Nature 159 (1947) 476; Proc. Physic. Soc. 62 (1949) 741.

¹⁴²) KRENZEN, O., Z. Physik 126 (1949) 666.

¹⁴³) Arbeiten über PbSe: SIMPSON, O., Nature 160 (1947) 791; BLACKWELL, D. E., SIMPSON, O., und SUTHERLAND, G. B. B. M., Nature 160 (1947) 793; MOSS, T. S., und CHASMAR, R. P., Nature 161 (1948) 244; MILNER, C. J., und WATTS, B. N., Nature 163 (1949) 322 (die letzteren stellen PbSe-Spiegel auf chemischem Wege als Ausgangsschichten her).
Arbeiten über PbTe: SIMPSON, O., SUTHERLAND, G. B. B. M., und BLACKWELL, D. E., Nature 161 (1948) 281; MOSS, T. S., Nature 161 (1948) 766.

¹⁴⁴) MILNER, C. J., und WATTS, B. N., Nature 163 (1949) 322.

¹⁴⁵) FRERICHS, R., Vortrag Physik. Gesellsch., Göttingen 1946; Physic. Rev. 72 (1947) 594.

¹⁴⁶) GÖRLICH, P., und HEYNE, I., Optik 4 (1948/49) 206.

¹⁴⁷) KOLOMJEZ, B. T., und BYWIKIN, S. M., J. techn. Physik (russ.) 17 (1947) 987; vgl. für Indiumsulfid auch SCHAFFERNICKT, W., und HELBIG, H., Physik. Bl. 5 (1949) 63 ($\lambda_{max} = 620 \text{ m}\mu$).

§4. Einzelliteratur

¹⁴⁸) WEISS, K., Z. Naturforschg. 2a (1947) 650; weitere Arbeiten über den inneren lichtelektrischen Effekt an CdS vgl. WILKINS, M. H. F., und GARRICK, G. F. J., Nature 161 (1948) 565; FRERICHS, R., und SIEGERT, A. J. F., Physic. Rev. 74 (1948) 1875.

¹⁴⁹) GOLDMAN, J. E., und LAWSON, A. W., Physic. Rev. 64 (1943) 138.

¹⁵⁰) BRENTANO, J. C. M., und DAVIS, D. H., Physic. Rev. 74 (1948) 711.

¹⁵¹) Vgl. z. B. Research 2 (1949) 389.

¹⁵²) MOSS, T. S., Proc. Phys. Soc. 63 (1950) 167.

¹⁵³) SZENT-GYÖRGYI, A., Nature 157 (1946) 875.

¹⁵⁴) WEST, W., und CARROLL, B. H., J. Chem. Physics 15 (1947) 529.

¹⁵⁵) CHLEBNIKOW, N. S., und MELAMID, A. E., Ber. Akad. Wiss. UdSSR 63 (1948) 649.

¹⁵⁶) Zusammenfassung und ausführliche Literaturangaben über die Arbeiten W. SCHOTTKYS und seiner Mitarbeiter siehe z. B. NÖLDGE, H., Physik. Z. 39 (1938) 546.

¹⁵⁷) BRUCKSCH, W. F., ZIEGLER, W. T., BLANCHARD, E. R., und ANDREWS, D. H., Physic. Rev. 59 (1941) 1045.

¹⁵⁸) ROTHER, F., und BOMKE, H., Physik. Z. 34 (1933) 865.

¹⁵⁹) FUSON, N., J. Opt. Soc. Am. 38 (1948) 845 (dort auch Einzelheiten über die Versuchstechnik).

¹⁶⁰) BULIAN, W., Physik. Z. 34 (1933) 745.

¹⁶¹) GÖRLICH, P., Z. techn. Physik 16 (1935) 268.

¹⁶²) Vgl. FREIWERT, S. I., und BERDNIKOW, N. B., Mémoires de Phys. Ukrainiens 5 (1936) 211; J. techn. Physik (russ.) 7 (1937) 1333; über die Herstellung einer Batterie aus einer Summe von Selensperrschichtzellen, voneinanderlich für photometrische Arbeiten, vgl. FREIWERT, S. I., und BERDNIKOW, N. B., Opt.-mech. Ind. (russ.) (1939) 13.

¹⁶³) KNOLL, O., Licht 7 (1935) 167; MOON, P., u. a., Trans. III. Eng. Soc. 32 (1937) 379.

¹⁶⁴) GÖRLICH, P., Z. Physik 112 (1939) 490.

¹⁶⁵) PUZEJKO, K., Z. techn. Physik (russ.) 8 (1938) 645.

¹⁶⁶) Vgl. GÖRLICH, P., und LANG, W., Z. physik. Chemie (B) 41 (1938) 23.

¹⁶⁷) SCHWEICKERT, H., Z. Physik 109 (1938) 413.

¹⁶⁸) FENNER, E., GUDDEN, B., und SCHWEICKERT, H., Sitzungsber. Physik.-mediz. Soz. Erlangen 71 (1939) 131.

¹⁶⁹) SANDSTRÖM, A. E., Philos. Mag. 37 (1946) 347; über interessante Versuche mit Kadmiumoxydzwischenlagen vgl. PRESTON, J. S., Proc. Roy. Soc. 202 (1950) 449.

¹⁷⁰) Vgl. z. B. BARNARD, G. B., Proc. Physic. Soc. 47 (1935) 477; PRESTON, J. S., J. Inst. Electr. Eng. 79 (1936) 424; KOLOMJEZ, B. T., Z. techn. Physik (russ.) 7 (1937) 393.

¹⁷¹) ECKART, F., und SCHMIDT, A., Z. Physik 118 (1941) 199; SANNER, H. G., Ann. Phys. 7 (1950) 416.

¹⁷⁰) KOLOMIEZ, B. T., und PUZENKO, E. K., Z. exper. und theor. Phys. (russ.) 17 (1947) 818; Ber. Akad. Wiss. UdSSR. 56 (1947) 587.

¹⁷¹) KREBS, H., Z. Metallkde. 40 (1949) 29; Z. Physik 126 (1949) 769.

¹⁷²) LEHOVEC, K., Z. Physik 124 (1948) 451.

¹⁷³) SPENKE, E., Z. Naturforsch. 4a (1949) 37.

¹⁷⁴) ROSE, F., und SCHMIDT, H., Z. Naturforsch. 2a (1947) 226.

¹⁷⁵) KOLOMIEZ, W. T., C. R. Acad. Scien. (russ.) 19 (1938) 383; NIX, F. C., und TREPTOW, A. W., J. Opt. Soc. Am. 29 (1939) 457; KOLOMIEZ, W. T., Z. techn. Phys. (russ.) 17 (1947) 195.

¹⁷⁶) GUILLERY, P., Forschungsarbeiten über infrarote Strahlungsempfänger, Berlin 1944; FRANK, K., und RAITHEL, K., Z. Physik 126 (1949) 377.

¹⁷⁷) JUSÉ, W. P., Physik. Z. Sowjet. 7 (1935) 1; LIANDRAT, G., Thèses (Univ. de Paris) (1935) 60.

¹⁷⁸) ECKART, P., und GUDDEN, B., Naturwiss. 29 (1941) 575.

¹⁷⁹) Vgl. von den neueren Arbeiten KOSENKO, W. E., und MIESELJUK, E. G., J. techn. Physik (russ.) 18 (1948) 1369 (dort finden sich auch Angaben über die statische Charakteristik, die Volt-Ampere-Charakteristik und die Temperaturabhängigkeit der Photo-EMK und des Photostromes der Ag_2S -Sperrsichtzellen).

¹⁸⁰) GOOS, F., Ann. Physik 39 (1941) 293.

¹⁸¹) FISCHER, F., GUDDEN, B., und TREU, M., Physik. Z. 39 (1938) 127.

¹⁸²) STEINBERG, D. S., Ukr. physik. Abhandl. 1 (1926) 45.

¹⁸³) BERGMANN, L., und HÄUSLER, J., Z. Physik 100 (1936) 50.

¹⁸⁴) JUSÉ, W. P., und RYVINKIN, S. M., Ber. Akad. Wiss. UdSSR 62 (1948) 55.

¹⁸⁵) PUZEIKO, E., J. physik. Chem. (russ.) 22 (1948) 1172; PUZEIKO, E. K., und TERENIN, A. N., J. physik. Chemie (russ.) 23 (1949) 676.

¹⁸⁶) Vgl. GÖRLICH, P., und GROSSKURTH, K., Forschungsarbeiten über infrarote Strahlungsempfänger, Berlin 1944.

¹⁸⁷) SPECHT, P., Z. Physik 90 (1934) 145; LOSEV, O. V., C. R. Acad. sci. UdSSR. 29 (1940) 360.

¹⁸⁸) BENZER, S., Physic. Rev. 70 (1946) 105; 72 (1947) 1267.

¹⁸⁹) HEINE, H. G., und SCHERRER, P., Helv. Physica Acta 13 (1940) 489.

¹⁹⁰) KENDALL, J. T., Proc. Roy. Soc. 56 (1944) 123; FAIRWEATHER, A., Proc. Roy. Soc. 56 (1944) 270.

¹⁹¹) BUSCH, G., und LABHART, H., Helv. Physica Acta 19 (1946) 463.

¹⁹²) Vgl. z.B. TEAL, G. K., FISHER, J. R., und TREPTOW, A. W., J. appl. Physics 17 (1946) 879.

¹⁹³) SHIVE, J. N., Physic. Rev. 76 (1949) 575.

¹⁹⁴) LEGRAND, K., Z. Physik 124 (1947) 219.

¹⁹⁵) Vgl. z.B. KRON, G. E., Harvard Observ. Monogr. 7, Cent. Symp. (1946) 145.

¹⁹⁶) HULL, A. W., Gen. Electr. Rev. 32 (1929) 213, 390.

¹⁹⁷) CRAMWINCKEL, A., J. Soc. Mot. Pict. Eng. 49 (1947) 523.

§4. Einzelliteratur

¹⁹⁸) GONCHARSKII, L. Z. techn. Phys. (russ.) 10 (1940) 237.

¹⁹⁹) GÖRLICH, P., Z. Physik 96 (1935) 588; IAMS, H., und SALZBERG, B., Proc. Inst. Radio Eng. 23 (1935) 55; SIMON und SUHRMANN, Lichtelektrische Zellen und ihre Anwendung (1932), S. 101.

²⁰⁰) KLUGE, W., BEYER, O., und STEYSKAI, H., Z. techn. Physik 18 (1937) 219.

²⁰¹) ZWORYKIN, V. K., J. Inst. Electr. Eng. 79 (1936) 1.

²⁰²) WEISS, G., in Busch-Brücke: Beiträge zur Elektronenoptik 1937, S. 112.

²⁰³) PIERCE, J. R., Bell. Lab. Rec. 16 (1938) 305; ZWORYKIN, V. K., und RAJCHMAN, J. A., Proc. Inst. Radio Eng. 27 (1939) 558; RAJCHMAN, J. A., und SNYDER, R. L., Electronics 1940, 20; vgl. auch zusammenfassende Darstellung RODDA, S., J. sci. Instr. 26 (1949) 65.

²⁰⁴) ZWORYKIN, V. K., J. Frankl. Inst. 215 (1933) 535; Z. techn. Physik 17 (1936) 170; ZWORYKIN, V. K., MORTON, G. A., und MALTER, L., Proc. Inst. Radio Eng. 24 (1936) 351; SCHNITGER, H., Elektrotechn. Z. 63 (1942) 41.

²⁰⁵) WEISS, G., Z. techn. Physik 17 (1936) 626; HARTMANN, W., Z. Fernsch. GmbH. 1 (1939) 226.

²⁰⁶) FARNSWORTH, P. T., J. Frankl. Inst. 218 (1934) 411; HENNEBERG, W., ORTHUBER, R., und STEUDEL, B., Z. techn. Physik 17 (1936) 115.

²⁰⁷) ORTHUBER, R., und RECKNAGEL, E., Jahrb. AEG-Forschg. 6 (1939) 86.

²⁰⁸) MITO, S., Elektrotechn. J. (jap.) 1 (1937) 168; OKABE, K., Rep. Radio Res. Japan 6 (1936) 1.

²⁰⁹) OKABE, K., Rep. Radio Res. Japan 6 (1936) 75.

²¹⁰) REICHEL, W., Physik. Z. 44 (1943) 279.

²¹¹) KUBETZKI, L. A., Proc. Inst. Radio Eng. 25 (1937) 421.

²¹²) SCHNITGER, S., Wiss. Veröff. Siemens Konz. 20 (1941) 1; MAURER, G., Archiv Elektrotechn. 36 (1942) 608.

²¹³) KUBETZKI, L. A., Nachr. Akad. Wiss. UdSSR. (Serie Physik) 8 (1944) 6, 357; FEINSTEIN, S. M., J. techn. Phys. (russ.) 20 (1950) 361.

²¹⁴) KRAUTZ, E., Z. Naturforsch. 4a (1949) 284.

²¹⁵) WESCH, L., Ann. Physik 40 (1941) 249.

²¹⁶) Vgl. z.B. BOUTRY, G. A., und GILLON, P., Philos. Mag. 28 (1939) 163; PRESTON, J. S., und McDermott, L. S., Proc. Physic. Soc. 46 (1934) 256.

²¹⁷) KORTÜM, G., Physik. Z. 32 (1931) 417.

²¹⁸) KRÜGER, H., und WEIDERT, F., Z. techn. Physik 20 (1939) 50.

²¹⁹) SUHRMANN, R., Physik. Z. 32 (1931) 929; Naturwiss. 16 (1928) 336; HARTMANN, W., Naturwiss. 30 (1942) 712.

²²⁰) LAWRENCE, B. O., und LINFORD, L. B., Physic. Rev. 35 (1930) 482.

²²¹) FLEISCHER, R., und GÖRLICH, P., Z. Physik 94 (1935) 597.

²²²) PENNIG, F. M., und MOUBIS, J., Physica 2 (1935) 55.

²²³) GEEST, H., Z. Hochfrequenztechn. Elektroak. 57 (1941) 75; SEKI, T., NIJOH, T., und MATSUDAIRA, Nippon electr. Comm. Eng. 18 (1939) 123.

²²⁴) KRUITHOF, A. A., Philips Techn. Rundschau 4 (1939) 56.

225) KLUGE, W., BEYER, O., und STEYSKAL, H., Z. techn. Physik 18 (1937) 219; HARTMANN, W., Z. Fetsch GmbH, 1 (1939) 226.
 226) Vgl. z.B. SEWIG, R., Z. techn. Physik 11 (1930) 269; FUCHS, O. D., und KOTTAS, R., Z. techn. Physik 17 (1936) 47.
 227) GUDDEN, E., und HENNINGER, P., Z. Physik 125 (1949) 757.
 228) ATKINSON, J. R., CAMPBELL, H. R., PALMER, B. H., und WINDE, G. T., Proc. Physic. Soc. 50 (1938) 934.
 229) Vgl. z.B. DRESLER, A., GOLDMANN, L., und REEB, O., Licht 3 (1933) 228.
 230) HAMAKER, H. C., und BREZHOLD, F. W., Physica 1 (1933) 119; BERGMANN, L., und PELZ, R., Z. techn. Physik 18 (1937) 185; BJÖRNSTAHL, J., Z. Instrumentenkde. 62 (1942) 181; theoretische Überlegungen über den Zusammenhang des Photostromes, der Photospannung und des inneren Widerstandes von der Belichtungsintensität, sowie über die Abhängigkeit des Photostromes und der Photospannung von der Temperatur s. auch TOMURA, M., Bull. Chem. Soc. Japan 22 (1949) 52.
 231) BECKER, A., Z. Physik 112 (1939) 629.
 232) Vgl. z.B. HOUSTOUN, R. A., und HOWATSON, A. F., Philos. Mag. 36 (1945) 279; SANDSTRÖM, A. E., Ark. f. Matem., Astr. o. Fys. 31 (1946) N:o 9.
 233) GÖRLICH, P., und MEYER, E. J., Z. Astrophysik 16 (1938) 343.
 234) Vgl. z.B. GÖRLICH, P., Z. Physik 83 (1933) 128.
 235) DE BOER, J. H., und TEVES, M. C., Z. Physik 73 (1932) 192; 83 (1933) 521.
 236) SUHRMANN, R., und DEMPSTER, D., Physik. Z. 35 (1934) 148; Z. Physik 94 (1935) 742.
 237) Vgl. u. a. DRESLER, A., Licht 11 (1941) 139; Lebensdaueruntersuchungen auch bei FREIWERT, S. I., J. techn. Physik (russ.) 6 (1936) 1855.
 238) Vgl. insbes. PRESTON, J. S., J. Inst. Electr. Eng. 79 (1936) 424; KNOLL, O. H., Diss. Karlsruhe 1936; HOUSTOUN, R. A., Philos. Mag. 31 (1941) 498; HUNTER, R. S., J. Opt. Soc. Am. 30 (1940) 536.
 239) Vgl. hierzu z. B. PRESTON, J. S., Trans. Ill. Eng. Soc. 8 (1943) 136; Rev. d'Optique 27 (1948) 520 (beide Literaturstellen enthalten übrigens eine größere Anzahl von Erfahrungen über Eigenschaften, die im National Physical Laboratory sowohl an Sperrschichtzellen, als auch an Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für photometrische Arbeiten gesammelt wurden).
 240) HOUSTOUN, R. A., Philos. Mag. 37 (1946) 13.
 241) Vgl. hierzu noch: MORRIS, L. W., Physic. Rev. 37 (1931) 1263; WINCH, R. P., Physic. Rev. 37 (1931) 1269.
 242) SUHRMANN, R., Physik. Z. 34 (1933) 877.
 243) Vgl. z.B. WOOLDRIDGE, D. E., Physic. Rev. 58 (1940) 316.
 244) AMERIO, A., Instit. Lomb. Sci. Lettre Rend. 68 (1935) 736.
 245) JUSÉ, W. P., und RYWKIN, S. M., Ber. Akad. Wiss. UdSSR, (1947).
 246) WATTS, B. N., Proc. Physic. Soc. A 62 (1949) 456.

§4. Einzelliteratur

247) TEICHMANN, H., Z. Physik 67 (1931) 192; LANGE, B., Physik. Z. 32 (1931) 850; BULLAN, W., Physik. Z. 34 (1933) 745.
 248) BERGMANN, L., und PELZ, R., Z. techn. Physik 18 (1937) 177; BECKER, A., Z. Physik 114 (1939) 342; MACGREGOR-MORRIS, J. T., und BILLINGTON, R. M., J. Inst. Electr. Eng. 79 (1936) 435.
 249) BARNARD, G. P., Proc. Physic. Soc. 51 (1939) 222.
 250) MENDE, G., Diss. Leipzig 1941; GRIVET, M. P., Ann. de Physique 17 (1942) 72.
 251) LEO, W., und MÜLLER, C., Physik. Z. 36 (1935) 113.
 252) ROGGENDORF, A., Physik. Z. 36 (1935) 660; OLLENDORF, F., Z. techn. Physik 13 (1932) 606; CAMPBELL, N. R., Philos. Mag. 14 (1932) 465; YOUNG, L. A., und BRADBURY, W. K., Physic. Rev. 43 (1933) 34; CAMPBELL, W. R., NOVEL, H. R., und STOODLEY, L. G., Proc. Physic. Soc. 48 (1936) 589; CAMPBELL, W. R., und RIVEIN, R. S., Proc. Physic. Soc. 49 (1937) 12; SKELLETT, A. M., J. appl. Physics 9 (1938) 631; ENGSTROM, R. W., und RUXFORD, W. S., Physic. Rev. 58 (1940) 67.
 253) MALTER, L., Proc. Inst. Radio Eng. 29 (1941) 587.
 254) SCHÖNWALD, B., Ann. Physik 15 (1932) 395; GÖRLICH, P., Z. techn. Physik 14 (1933) 144; GUNDLACH, F. W., Archiv Elektrotechn. 30 (1936) 625.
 255) Vgl. GURSKI, W., Licht 12 (1942) 176, 217; FINKELNBURG, W., und SCHLUGE, H., Z. techn. Physik 24 (1943) 72.
 256) POTAPENKO, J. R., J. techn. Physik (russ.) 18 (1948) 1356.
 257) SCHOTTKY, W., in Wien-Harms, Handbuch der Experimentalphysik XIII, 2. Teil, 1928, S. 270; v. ORBAN, F., Z. techn. Physik 13 (1932) 420; 14 (1933) 137; JOHNSON, E. A., MOCK, W. H., und HOPKINS, R. W., J. Opt. Soc. Am. 29 (1939) 506; STRUTT, M. J., und VAN DER ZIEL, A., Physica 8 (1941) 576.
 258) JOHNSON, J. B., Physic. Rev. 26 (1925) 71.
 259) NYQUIST, H., Physic. Rev. 32 (1928) 110; SPENKE, E., Wiss. Veröff. Siemens-Werke 18 (1938) 54.
 260) SCHULZE, R., Z. Physik 90 (1934) 63.
 261) TAYLOR, CH., J. Phys. et le Radium 10 (1949) 255.
 262) S. Fuhrnote 6; IX, § 2; ENGBERT, W., Telefunkenröhre (1938) 127.
 263) AMREIN, W., Schweizer Archiv 9 (1943) 3.
 264) ENGSTROM, R. W., Rev. sci. Instr. 18 (1947) 587.
 265) Vgl. z.B. KRON, G. E., Astrophysic. J. 103 (1946) 163.
 266) DAVYDOV, B., und GUREVICH, B., J. Physics (UdSSR) 7 (1943) 138; GOLF, J. H., Physica 15 (1949) 825.
 267) MATAŘE, H. F., Z. Naturforschg. 4a (1949) 275 (dort auch weitere Literatur).
 268) ARSENJEWA-HEIL, A. N., J. techn. Physik (russ.) 17 (1947) 903.
 269) HARRIS, E. J., Electronic Eng. (1948) 145.
 270) RAJEWSKY, W., Z. Physik 63 (1930) 576; Physik. Z. 32 (1931) 121; Ann. Physik 20 (1934) 13; BRINKMANN, C., Z. Instrumentenkde. 64 (1944) 46.

²⁷¹⁾ ZEILLER, O., Z. Instrumentenkde. 58 (1938) 207; KORFF, A., Rev. mod. Physics 14 (1942) 1.

²⁷²⁾ TROST, A., Physik. Z. 36 (1935) 801.

²⁷³⁾ PUPKE, H., Z. techn. Physik. 18 (1937) 326.

²⁷⁴⁾ KIEPENHEUER, K. O., Z. Astrophysik 14 (1937) 348; HAUSSEK, K. W., und KREUCHEN, K. H., Z. techn. Physik 15 (1934) 20; AUDUBERT, R., J. Physique Radium 6 (1935) 451; AUDUBERT, R., und REITHMÜLLER, C., Compt. Rend. 200 (1935) 389; 206 (1938) 1005; DAUVILLIER, A., Compt. Rend. 212 (1941) 958; J. Physique Radium 3 (1942) 29; besonders gute Ergebnisse sind mit Au als Kathodenmaterial zu erzielen, vgl. RAMM, C. A., J. sci. Instr. 24 (1947) 320.

²⁷⁵⁾ Vgl. z. B. NEUERT, H., Z. Naturforschg. 3a (1948) 221.

²⁷⁶⁾ CHRISTOPH, W., Ann. Physik 23 (1935) 747.

²⁷⁷⁾ KIEPENHEUER, K. C., Z. Physik 107 (1937) 145.

²⁷⁸⁾ TZSCHASCHEL, R., Z. Physik 111 (1938) 215.

²⁷⁹⁾ REISS, K. H., Z. Physik 93 (1935) 511.

²⁸⁰⁾ GREINACHER, R., Z. Techn. Physik 16 (1935) 165; 19 (1938) 132, 592; RYTZ, A., Helv. Phys. Acta 22 (1949) 3.

²⁸¹⁾ JEANGUENIN, P., Helv. Physica Acta 17 (1944) 319.

²⁸²⁾ GÖRLICH, P., Ann. Physik 13 (1932) 831.

²⁸³⁾ OGG, R. A., J. Chem. Physics 14 (1946) 295; TEAL, G. K., Physic. Rev. 71 (1947) 138.

²⁸⁴⁾ BAY, Z. Sci. Instr. 12 (1941) 127.

§ 5. Ergänzungen (nach dem Umbruch)

a) Zu II. Abschnitt §1:

Auch in lichtelektrischer Hinsicht haben die Stoffe Ge, Si und SiC, die zur Herstellung von Gleichrichtern und von Transistoren Verwendung finden, an Bedeutung gewonnen (vgl. VIII, § 3a). Diese Stoffe besitzen ein Gitter, welches ganz aus neutralen Atomen aufgebaut ist. Der Mechanismus der Elektronenleitung dieser Stoffe wird sich daher unterscheiden müssen von dem, der für die Ionenkristalle angenommen werden kann. Experimentell hat sich ergeben, daß der Einbau dreiwertiger Elemente in Si und Ge Defektleitung, hingegen der Einbau fünfwertiger Elemente Überschußleitung hervorruft. Im ungestörten Gitter wird z.B. jedes der vierwertigen Si-Atome tetraedrisch von vier Si-Atomen umgeben. Beim Ersatz eines Si-Atoms durch ein Atom eines fünfwertigen Elementes ergibt sich ein Elektron als Überschuß, weil dieses eine Elektron nicht als Bindungselektron benutzt wird (also Überschußleitung), hingegen fehlt beim Ersatz eines Si-Atoms durch ein dreiwertiges Atom ein Bindungselektron, so daß sich Defektleitung ergeben muß. Die Halbleiter mit homöopolarer Bindung muß man demzufolge als amphotere Halbleiter ansehen

§ 5. Ergänzungen

265

(vgl. zusammenfassende Darstellung, TORREY, H. C., und WITTMER, C. A., Crystal Rectifiers, 1948).

b) Zu IV. Abschnitt § 3b:

Anfügung an Fußnote ⁴⁸⁾ SUHIRMANN, R., Naturwiss. 37 (1950) 329.

c) Zu IV. Abschnitt § 4:

Anfügung an Fußnote ⁶⁰⁾ JANES, R. B., JOHNSON, R. E., und HANDEL, R. R., RCA-Review 10 (1949) 586.

Durch Untersuchungen von LOOSJES, R., und VINK, H. J. J. appl. [Physics 20 (1949) 884, Philips' Techn. Rundsch. 11 (1950) 275] wird ein neuer Vergleich zwischen glühelektrischen Oxydkathoden und zusammengesetzten lichtelektrischen Kathoden (insbesondere den Cs₂O-Kathoden) nahegelegt, und zwar wird das Augenmerk auf die sogenannte „Porenleitung“ gerichtet. Die Elektronennachlieferung bei der glühelektrischen Emission der Oxydkathoden wird offensichtlich auch durch Elektronen besorgt, die sich in den Poren der Oxydschicht als „Elektronengas“ befinden. Die theoretische Bestimmung der Elektronendichte in einem Raum, der von Elektronen emittierenden Wänden eingeschlossen ist, wurde schon früher durch VON LAUE, M. [Ann. Physik 58 (1919) 695] bekannt. Die Experimente lassen sich in Übereinstimmung mit den LAUESCHEN theoretischen Folgerungen bringen. Man wird auch beim Studium des Mechanismus der Elektronennachlieferung insbesondere an Cs₂O-Kathoden die Porenleitung in Rechnung setzen müssen.

Besonderes Interesse verdienen auch die Arbeiten des leider früh verstorbenen SAYAMA, Y. [vgl. z. B. J. Phys. Soc. of Japan 1 (1946) 13; 2 (1947) 103]. SAYAMA untersuchte einmal die Abhängigkeit der lichtelektrischen Emission und der glühelektrischen Emission der Cs₂O-Kathoden mit und ohne Ag-Aktivierung vom Verhältnis Cäsium zu Sauerstoff (im Bereich Cs/O = 1,76 bis 3,18) und zum anderen erweiterte er in Anlehnung an die Asaoschen Versuche ⁵⁸⁾ die optische Theorie der spektralen Empfindlichkeit von Cs₂O-Kathoden [vgl. auch ⁶⁰⁾]. Beide Arbeiten enthalten Beiträge zur Frage des Arbeitsmechanismus von Cs₂O-Kathoden, insbesondere auch den Hinweis auf einen primären inneren lichtelektrischen Effekt (vgl. IV, § 4i, t).

Nach freundlicher brieflicher Mitteilung untersuchten KOBAYOSY, A., und TIKAZUMI, S. (Tokyo-Shibaura Electr. Co), die Abhängigkeit der lichtelektrischen Emission und des elektrischen Widerstandes der Sb, Cs-Kathoden vom Verhältnis Cs/Sb im Bereich von 0,5 bis 3, wobei sie ein Ansteigen der lichtelektrischen Emission bis zum Verhältnis 3 (entsprechend SbCs₃, vgl. IV, § 4r) fanden, in dem gleichen Bereich aber einen Gang des elektrischen Widerstandes über drei stark ausgeprägte Maxima und Minima hinweg.

Unter ganz bestimmten Bedingungen beobachtete Joshi in einer selbständigen Gasentladung eine Verminderung des Entladungsstromes, wenn eine Bestrahlung der Elektroden mit sichtbarem oder ultraviolettem Lichte oder

Lichteinwirkung soll bewirken, daß der Widerstand der Sperrsichten herabgesetzt wird und je Lichtquant sollen mehrere Elektronen durchgelassen werden.

i) Zu VI. Abschnitt § 6f:

Im Zusammenhange mit dem Effekt der Vernichtung der Supraleitung durch ultrarote Strahlung interessiert gewiß die Beobachtung von JUSTI, E. [Physik. Z. 44 (1943) 469; Naturwiss. 33 (1946) 292], daß in besonderen, nicht stöchiometrisch zusammengesetzten NbN-Präparaten mit Kristallbaufehlern die Supraleitung innerhalb von Mikrobereichen bereits bei 113° K einsetzen kann.

k) Zu VIII. Abschnitt § 3a:

Es hat sich gezeigt, daß durch Beschuß von Ge mit Neutronen, Deuteronen oder α -Strahlen die Halbleitereigenschaften dieses Stoffes geändert werden können [vgl. LARK-HOROVITZ, K., Electr. Engin. 68 (1949) 1047; CLELAND, J. W., LARK-HOROVITZ, K., und PRIGG, J. C., Phys. Rev. 78 (1950) 814; CRAVENFORD, J. H., und LARK-HOROVITZ, K., Phys. Rev. 78 (1950) 815]. Man kann auf diese Weise eine Art Doppelhalbleiter, also Überschuhhalbleiterschicht in Verbindung mit Mangelhalbleiterschicht ein und derselben Grundsubstanz Ge, herstellen und u.U. vorteilhaft zur Herstellung einer Ge-Sperrsichtzelle benutzen.

l) Zu IX. Abschnitt § 1c:

Ergänzungen zu den Tab. 16, 18, 19 und 20.

Die Tabellen 16, 18, 19 und 20 zeigen nach Meinung des Verfassers auf, welche Firmen bzw. Werkstätten sich mit der Herstellung von Photozellen in den Jahren 1944/45 befaßten. Die Tabellen bedürfen naturgemäß einer laufenden Ergänzung. Neu hinzuzufügen sind:

Name des Herstellers	Art der hergestellten Photozellen	Anwendungszweck	Besondere Kennzeichen
Physikalisch-Technische Werkstätten, Prof. Heimann, Wiesbaden	Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt	Tonfilm, technische und wissenschaftliche Anwendungen	Vakuumzellen und gasgefüllte Zellen mit Cäsiumoxydkathoden
Forschungs- und Entwicklungslaboratorium, Dr. G. Mau- rer, Kohlberg Kr. Nürtingen	Vervielfacher, elfstufig	technische und wissenschaftliche Anwendungen	Cäsiumoxydkathoden

§ 5. Ergänzungen

m) Zu IX. Abschnitt § 1g:

Eine möglicherweise serienmäßig einführbare Spezialzelle kann in der Zwei-anodenzelle gesessen werden, bei der zwei Anoden hintereinander vor der Kathode angeordnet sind (äußere Anode arbeitet als Lastanode, die innere variiert den Betrag der Emission zur Lastanode, Arbeitsweise also ähnlich der einer Triode), vgl. CROW, J. H., und RIDEOUT, V. C., Radio and Telev. News 14 (1950) 8, Heft 2.

n) Zu IX. Abschnitt § 2b:

Anfügung an Fußnote²⁰⁵) SOMMER, A., u. TURK, W. E., J. sci. Instr. 27 (1950) 113. Durchsichtige Cäsium-Antimonschicht mit speziell ausgebildeten Netzzelektroden als SE-Kathoden.

Anfügung an Fußnote²⁰⁶) GREENBLATT, M. H., Rev. sci. Instr. 20 (1949) 646.

o) Zu X. Abschnitt § 1d:

Die Kompliziertheit der Zusammensetzung moderner photoelektrischer Schichten (auch der Schichten für den inneren lichtelektrischen Effekt und für die Sperrsichtzellen) bringt es mit sich, daß bei punktweiser Abtastung der lichtempfindlichen Fläche Unterschiede in der Empfindlichkeit der Schicht feststellbar sind. Wie PETERSON, E. W., und HOLLAND, D. H. [J. Opt. Soc. Am. 40 (1950) 253] beim Überstreichen einer Vervielfache-kathode mit einem 0,2 mm breiten und 1 cm langen Lichtstrich fanden, ist beim Vervielfacher die von Ort zu Ort schwankende Empfindlichkeit zusätzlich abhängig von der zwischen Photokathode und erster SE-Kathode liegenden Spannung.

p) Zu X. Abschnitt § 5d:

Praktisch ergaben sich bei einem weiteren Exemplar (elektrostatisch fokussierter Vervielfacher mit 9 Stufen) ein Dunkelstrom von $\sim 10^{-8}$ Amp bei 50 Volt/Stufe und $\sim 10^{-7}$ Amp bei 100 Volt/Stufe (wobei im letzten Falle die thermische Emission überwog), die Nachweigrenze (für 1 Hz Bandbreite) zu 5×10^{-12} lm (Zellenstrom 5×10^{-11} Amp) und bei Kühlung bis auf -190° C zu 10^{-13} lm (Wechsellicht in den beiden letzten Fällen 90 Hz), als Lichtzähler bei -190° arbeitend zu 2×10^{-10} lm, vgl. ENGSTROM, R. W., J. Opt. Soc. Am. 37 (1947) 420.

q) Zu XI. Abschnitt:

Für quantitative Messungen mit Lichtzählern ist die Konstanz des Nulleffektes (in gewissen Fällen genügt die Kenntnis der zeitlichen Änderungen des Nulleffektes) nötig. Auch in bezug auf die Konstanz der lichtelektrischen Empfindlichkeit müssen Forderungen erhaben werden. Aus diesen Gründen ist ein nochmaliger Hinweis auf Untersuchungen wertvoll, die sich mit der Konstanz bzw. Inkonstanz des Nulleffektes und der lichtelektrischen Empfindlichkeit von Lichtzählern befassen²⁷⁵) [vgl. z.B. noch SPATZ, W. D. B., Physic.

Anhang

§ 5. Ergänzungen

Rev. 64 (1943) 236; LAUTERJUNG, K. H., und NEUERT, H., Z. Physik 122 (1944) 266; NEUERT, H., und LAUTERJUNG, K. H., Reichsber. Physik (1944) Heft 2]. Man geht wohl nicht fehl in der Annahme, daß das kurzwelligste UV, welches bei Gasentladungen auftritt, durch Hervorrufen von Entladungsprodukten, die ihrerseits auf der Kathode eine Senkung (gelegentlich auch Erhöhung) der Austrittsarbeit bewirken, für die Inkonstanz sowohl des Nulleffektes als auch der lichtelektrischen Empfindlichkeit verantwortlich ist. Jedenfalls dürfte NEUERT, H. [Z. f. Naturforschung 3a (1948) 226] auf Grund seiner Kontaktpotentialmessungen an bestrahlten Metallocydoberflächen zu einer solchen Erklärung berechtigt sein. In diesem Zusammenhange sei auch noch einmal auf die Ergebnisse von THEIN³⁴⁾ verwiesen.

Mit der Frage der Lebensdauer von Zählrohren mit Dampfzusatz befassten sich weiterhin TROST, A. [Z. angew. Phys. 2 (1950) 286] und auch KORFF, S. A., und KRUMBEIN, A. D. [Phys. Rev. 76 (1949) 1412]. Die letzteren fanden, daß sich NH₃ gefüllte (auch mit NH₃ + 20% Ar gefüllte) GEIGER-Zähler selbst regenerieren. Als Kathode wurde aufgedampftes Cu, Ag oder Ni, als Anode ein W-Draht (~0,1 mm Durchmesser) benutzt. Die Versuchsreihen erstreckten sich über zwei Jahre (Zahl der Impulse ~ 3 × 10¹⁰). Der Nulleffekt nahm nach langer Betriebsdauer etwas zu, jedoch wurde nach einer Ruhepause der Normalzustand wieder erreicht. Die lichtelektrische Empfindlichkeit stieg ebenfalls, blieb aber nach den Ruhepausen erhöht. Nach Meinung von KORFF und KRUMBEIN soll sich NH₃ beim Entladungsvorgang soweit wieder regenerieren, soweit es sich beim Lösungsvorgang zersetzt hatte.

ROICH, J. L. [J. exp. und theor. Phys. (russ.) 19 (1949) 269] hat einen Photonenzähler mit Na-Photokathode für das sichtbare Gebiet angegeben, insbesondere seine Herstellung (Elektrolyse, Sensibilisierung durch RUHMKORFF-Induktor).

Zur Herstellung einer ammoniakalischen Cs-Lösung sowie zur Orientierung über die Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit usw.) vgl. z.B. HODGINS, J. W., Canad. J. of Res. 27 (1949) 861, 874.

x) **Zu XII. Abschnitt § 2:**
(Aus „Naturforschung und Medizin in Deutschland“ Bd. 15, Elektronenemission, Elektronenbewegung und Hochfrequenztechnik, nach Unterlagen von ALLEKOTTE und SCHÖNWALD).

Empfänger	λ_{max} in m μ	Empfindlichkeit bei λ_{max} in A/Watt	Quantenequivalent	Trägheit in sec	innerer Widerstand in Ω (Größenordnung)		§ 5. Ergänzungen
					Machweisgrenze (bei günstigster Verstärkeranpassung 800 Hz Lichtunterbrechung; 2400° K. Lichtquelle)	Im Watt	
K ₂ O Vakuumzelle	405	20 × 10 ⁻³	0,06	$\sqrt{10^{-8}}$	10^{11}	4×10^{-7}	3,2 × 10 ⁻⁸
CsSb	460	40 × 10 ⁻³	0,11	$\sqrt{10^{-6}}$	10^{11}	7×10^{-7}	5×10^{-8}
Cs ₂ O „	800	20 × 10 ⁻³	0,03	$\sqrt{10^{-8}}$	10^{11}	2×10^{-7}	$1,6 \times 10^{-8}$
Cs ₂ O Gaszelle	800	100 × 10 ⁻³	0,15	$\sqrt{10^{-5}}$	10^{11}	4×10^{-7}	$3,2 \times 10^{-8}$
CdS TlS PbS	520	0,8	2,0	$< 10^{-4}$	10^8	8×10^{-8}	6×10^{-9}
	1000	2,4	3,0	$< 10^{-3}$	10^7	3×10^{-8}	6×10^{-9}
	2500	20	10,0	$< 10^{-3}$	10^5	2×10^{-8}	$1,6 \times 10^{-9}$
Se Sperrsichtzelle (Photoelement).	550	0,13	0,3	$< 10^{-2}$	10^3	2×10^{-6}	$1,6 \sim 10^{-7}$
TlS HgSe	1000	0,24	0,1	$\sqrt{10^{-2}}$	10^3	4×10^{-6}	3×10^{-8}
	1100	0,18	0,1	$< 10^{-2}$	10^3	6×10^{-6}	5×10^{-7}
PbS	Bleiglanznetzelle	2500	0,40	0,2	$< 10^{-4}$	1	2×10^{-6}
							$1,6 \times 10^{-7}$

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1. Aufbau der Elektronenhülle.
 " 2. Beispiele für Elektronenleiter.
 " 3. Langwellige Grenze und Austrittsarbeit reiner Metalle.
 " 4. Langwellige Grenzen und langwellige Maxima zusammengesetzter Cs-Kathoden.
 " 5. Lage der langwelligen Maxima von Alkalioxylkathoden.
 " 6. Empfindlichkeitsvergleiche zwischen den gebräuchlichen Kathoden.
 " 7. Quantenausbeuten von Legierungskathoden.
 " 8. Emissionskonstante A_{gl} und Austrittsarbeit φ_{gl} massiver, reiner Metalle.
 " 9. Austrittsarbeit und Mengenkonstante einiger bekannter Adsorptionsschichten.
 " 10. Austrittsarbeit und Mengenkonstante einiger oxydbedeckter Metalle.
 " 11. Anwendungsgebiete der Glühkathoden.
 " 12. Vergleich zwischen Austrittsarbeit und Sekundäremissionskoeffizienten einiger Metalle.
 " 13. Verbindungen mit $\delta < 2$ (a) und $\delta > 2$ (b).
 " 14. Absorptionsgrenzen λ_0 einiger Alkalihalogenide.
 " 15. Vorkommen von Bleiglanz mit Lichtwirkung.
 " 16. Überblick über technische Photozellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt.
 " 17. Übersicht über lichtelektrische Vervielfacher.
 " 18. Überblick über technische Photoelektronenvervielfacher.
 " 19. Hersteller von Photozellen mit innerem lichtelektrischen Effekt.
 " 20. Lieferfirmen für Sperrsichtzellen.

Namensverzeichnis

Adams 245
 Allekotte 271
 Allen, H. S. 250
 Allen, J. S. 266
 Amerio, A. 217, 262
 Amrein, W. 233, 263
 Anderson, J. S. 250
 Andrews, D. H. 119, 259
 Appleyard, E. T. S. 53, 254
 Arnika, H. J. 266
 Arssenjewa-Heil, A. N. 235, 263
 Asao, S. 61, 63, 65, 67, 254, 255, 265
 Atkinson, J. R. 200, 262
 Audubert, R. 242, 204
 Austin 246
 Avery 211
 Bailey, F. M. 83, 256
 Bainbridge 247
 Barnard, G. B. 125, 197, 198, 259
 Barnard, G. P. 219, 263
 Barnard, G. R. 250
 Barschewsky, B. 102, 257
 Bay 244, 264
 Beams, J. W. 95, 257
 Beck, G. 1, 252
 Becker, A. 106, 202, 219, 226, 250, 257, 262, 263
 Beeker, K. 83, 256
 Beequerel 2, 3, 103, 177, 245
 Beechhold, F. W. 201, 262
 Bell 175
 Benjamin, M. 95, 257
 Benzer, S. 137, 260
 Berdnikow, N. B. 122, 259
 Berglund 176
 Bergmann, L. 133, 134, 201, 219, 226, 247, 260, 262, 263
 Beyor, O. 159, 194, 261, 262
 Bidwell 175
 Billington, R. M. 219, 226, 263
 Björnstahl, J. 201, 262
 Campbell, H. R. 200, 223, 262
 Campbell, N. R. 223, 250, 263
 Campbell, W. R. 223, 263
 Cardwell, A. B. 46, 253
 Carroll, B. H. 116, 259
 Case, T. W. 109, 176, 246, 253
 Cashman, R. J. 49, 111, 114, 253, 258
 Chambor, C. C. 95, 257
 Chasmar, R. P. 114, 258
 Chesley, F. G. 109, 253

Gärtlich, Die lichtelektrischen Zellen

274

Namensverzeichnis

Chlebnikow, N. S. 76, 117, 256, 259
 Christoph, W. 243, 264
 Clapeyron 33
 Clausius 33
 Claussnitzer, J. 50, 253
 Cleland, J. W. 268
 Coblenz, W. W. 104, 257
 Compton 79, 246
 Coulomb 15
 Gramwinckel, A. 144
 Cravford, J. H. 268
 Crow, J. H. 269
 Custers, J. F. H. 64, 255
 Dahlstrom, R. K. 95, 257
 Dauvillier, A. 242, 264
 Davis, D. H. 115, 259
 Davydov, B. 234, 263
 Day 245
 Dehmelt, P. W. 66, 255
 Déjardin, G. 49, 253
 Dember, H. 9, 246, 247, 252
 Dempster, D. 208, 262
 Denmark, H. S. 109, 258
 Devoe, C. F. 49, 253
 Dippel, C. J. 64, 255
 Dirac 8
 Djatlowitzkaja, B. J. 76, 93, 256, 257
 Dobroljubsky 247
 Dosse, J. 250
 Drester, A. 200, 213, 262
 Eckart, F. 125, 259
 Eckart, P. 128, 260
 Einstein 19, 44, 246
 Elleman, A. J. 112, 258
 Elster, J. 59, 238, 245, 246, 254
 Enghert, W. 239, 263
 Engelhard, B. 103, 257
 Engstrom, R. W. 223, 234, 263
 Espe, W. 250
 Fabry 80
 Fairweather, A. 137, 260

Fan 42, 252
 Farnsworth, H. B. 89, 256
 Farnsworth, H. E. 46, 247, 253
 Farnsworth, P. T. 159, 261
 Faßbender, J. 26, 116, 252
 Feinstein, S. M. 172, 261
 Fennet, E. 124, 259
 Fermi 8, 45
 Field, L. M. 86, 256
 Fielding, T. J. 250
 Fink 267
 Finkelnburg, W. 227, 263
 Fischer, F. 191, 260
 Fisher, J. R. 137, 260
 Fleischer, R. 47, 54, 56, 59, 60, 63, 186,
 250, 253, 254, 261
 Fleischmann, R. 52, 253
 Forgue, S. V. 267
 Fournier d'Albe 176
 Fowler, R. H. 13, 21, 40, 41, 48, 78, 252
 Fox, G. W. 83, 256
 Frank, K. 111, 113, 126, 248, 258, 260,
 267
 Freiwert, S. I. 122, 213, 259, 262
 Frenkel 14
 Frerichs, R. 26, 115, 116, 248, 252, 258,
 259, 267
 Friedheim, J. 92, 257
 Friedrich, W. 46, 253
 Friemer, A. J. 67, 255
 Fritts 245
 Fröhlich, H. 42, 252
 Fröhlich, R. 35, 252
 Fuchs, O. D. 197, 262
 Fuchs, O. P. 251
 Fukuroi, T. 51, 253
 Fuson, N. 119, 259
 Gardner, L. P. 60, 254
 Garlick, G. F. J. 115, 259
 Geel, W. van 28, 29, 252
 Geest, H. 188, 261
 Geffken, H. 250
 Gehrecke 80

Namensverzeichnis

275

Geiger, F. H. 238, 239, 241, 246
 Geitel, H. 59, 238, 245, 246, 254
 Genzel, L. 111, 114, 258
 Gerding, H. 49, 253
 Gerding-Kroon, R. 49, 253
 Gerlach 246
 Geyer, K. 91, 257
 Gibson, A. F. 111, 114, 253, 267
 Gille, H. 92, 257
 Gillod, P. 182, 261
 Gisolf, J. H. 234, 263
 Glocker, R. 76, 255
 Glover, A. M. 75, 255
 Goldman, J. E. 115, 259
 Goldmann, L. 200, 262
 Goncharskij, L. 143, 261
 Goos, F. 130, 260
 Görlich, P. 58, 63, 64, 66, 68, 71, 72,
 73, 75, 76, 77, 78, 80, 90, 93, 111,
 112, 115, 117, 122, 123, 124, 125,
 126, 135, 137, 144, 159, 186, 205,
 207, 226, 231, 235, 244, 247, 248,
 250, 254, 255, 256, 258, 259, 260,
 261, 262, 263, 264
 Gramwinckel, A. 144, 260
 Greenblatt, M. H. 269
 Greinacher, R. 244, 264
 Grivet, M. P. 221, 263
 Großkurth, K. 135, 260
 Grützmacher 131, 135, 137
 Gudden, B. V. 22, 23, 52, 111, 113,
 114, 124, 128, 131, 195, 199, 246,
 248, 250, 253, 258, 259, 260, 262
 Guillery, P. 126, 129, 260
 Gundlach, F. W. 226, 263
 Gurevich, B. 234, 263
 Gurski, W. 227, 263
 Haehnberg, O. 94, 257
 Haenmann, D. 52, 253
 Haefer, R. 95, 257
 Hallwachs, W. 49, 245, 250, 253
 Hamaker, H. C. 201, 262
 Handel, R. R. 265
 Iams, H. 159, 261
 Ives, H. B. 55, 56, 61, 246, 254
 Jamieson, N. F. 69, 255
 Janes, R. B. 75, 255, 265
 Jeanguenin, P. 244, 264
 Jenkins, R. O. 95, 257

18*

Johannson, H. 83, 256
 Johnson, E. A. 229, 263
 Johnson, J. B. 229, 263
 Johnson, R. E. 265
 Joshi, S. S. 265, 266
 Jusé, W. P. 104, 127, 134, 217, 257, 260, 262
 Justi, E. 251, 268
 Kallmann, H. 26, 116, 252
 Karchanina, N. J. 76, 256
 Kawamura, H. 66, 255
 Keck, P. H. 111, 114, 258
 Keith-Brewer, A. 56, 254
 Kendall, J. T. 137, 260
 Kiepenheuer, K. C. 243, 264
 Kiepenheuer, K. O. 242, 264
 Kirehhoff 203
 Kirillov, E. A. 102, 257
 Kleen, W. 34, 252
 Kluge, W. 60, 64, 67, 69, 158, 159, 194, 247, 254, 255, 261, 262
 Knoll, M. 88, 94, 250, 256, 257
 Knoll, O. H. 123, 213, 219, 259, 262
 Kobayashi, A. 67, 255
 Kobazosy, A. 265
 Kollath, R. 89, 256
 Koller, L. R. 60, 61, 86, 247, 251, 254, 256
 Kolomijez, B. T. 115, 125, 258, 259, 260, 267
 Kolomijez, W. T. 126, 248, 260
 Korff, A. 238, 264
 Korff, S. A. 270
 Kortüm, G. 182, 261
 Kosenko, W. E. 128, 260
 Kotlarewsky, A. B. 102, 257
 Kottas, R. 197, 262
 Kramer, J. 51, 53, 253
 Krautz, E. 177, 178, 261
 Krebs, H. 126, 260
 Krenzien, O. 114, 248, 258
 Kreuchen, K. H. 242, 264
 Krieg, O. 266

Kron, G. E. 140, 234, 260, 263
 Krüger, H. 183, 261
 Kruithof, A. A. 193, 261
 Krumbein, A. D. 270
 Kubetzky, L. A. 165, 172, 261
 Kundt, W. 90, 256
 Kunz, J. 60, 254
 Kutzscher 111, 114, 248
 Kyropoulos, S. 97, 257
 Labhart, H. 137, 260
 Lance, T. N. C. 251
 Lang, W. 77, 111, 124, 144, 211, 248, 256, 259
 Lange, B. 28, 218, 247, 251, 252, 262
 Langer, K. 88, 256
 Langmuir 33
 Lark-Horovitz, K. 268
 Lau, E. 80, 256
 Laue, M. von 265
 Lauterjung, K. H. 270
 Lawrence, B. O. 186, 261
 Lawson, A. W. 115, 259
 Legrand, K. 138, 260
 Lehmann, H. 26, 116, 252
 Lehovec, K. 126, 260
 Lenard 243, 246
 Leo, W. 223, 226, 263
 Levinstein, H. 53, 254, 267
 Levy, I. Z. 102, 257
 Lewin, G. 76, 256
 Liandrat, G. 127, 260
 Liesegang 176
 Lifschitz, J. 3, 252
 Linford, L. B. 186, 261
 Loosjes, R. 265
 Loschkarew 248
 Losev, O. V. 137, 260
 Lotmar, W. 77, 256
 Lovell, A. C. B. 53, 254
 Lovell, B. 251
 Lukirsy 247
 Lukjanow, S. J. 251

McDermott, L. S. 182, 261
 MacGregor-Morris, J. T. 219, 226, 263
 Maciuic, G. 52, 253
 Mack, J. M. 49, 253
 Mackay 267
 Madelung 98
 Mahl, R. 95, 257
 Malter, L. 95, 96, 159, 224, 257, 261, 263
 Marx 43, 252
 Massay, H. S. W. 4, 252
 Mataré, H. F. 235, 236, 263
 Matsudaira 188, 261
 Mattler, J. 72, 255
 Maurer, G. 68, 79, 117, 168, 169, 255, 261
 Maxwell 19, 33
 Mayer, H. 43, 52, 55, 56, 252, 253, 254
 Melamed, A. E. 76, 256
 Melamid, A. E. 117, 259
 Mende, G. 221, 263
 Menschikow, M. I. 76, 236
 Mercadier 175
 Meyer 246
 Meyer, E. J. 205, 262
 Meyer, W. 4, 252
 Meyeren, W. A. von 251
 Michaelson, H. B. 89, 256
 Michelssen, F. 108, 135, 176, 247, 248, 257
 Mierdel, G. 250
 Mieseljuk, E. G. 128, 260
 Millikan, R. A. 17, 246, 252
 Milner, C. J. 114, 258
 Mitchell, J. W. 102, 257
 Mito, S. 159, 261
 Miyashita, Y. 50, 253
 Mock, W. H. 229, 263
 Möglich, F. 26, 116, 252
 Möglich, P. 4, 252
 Mönch, G. 106, 257
 Moon, P. 123, 259
 Morazov, G. 75, 255
 Morgulis, N. D. 76, 256
 Paetow, H. 96, 257
 Pakswar, S. 111, 114, 258
 Palmer, B. H. 200, 262
 Pauli 5
 Polz, R. 201, 219, 226, 262, 263
 Pennig, F. M. 187, 261
 Péro 80
 Peterson, E. W. 269

Pfund, A. H. 104, 107, 267
 Pick, H. 111, 114, 258
 Pierce, J. R. 159, 261
 Pierce, P. H. 69, 255
 Pigg, J. C. 268
 Pike, E. W. 92, 257
 Piore, R. R. 96, 257
 Pjatnitzky 247
 Planck 1, 8
 Pohl, R. W. 22, 23, 24, 25, 52, 59, 195,
 246, 247, 252, 253, 254
 Potapenko, J. R. 228, 268
 Prasad, B. N. 266
 Preston, J. S. 124, 125, 182, 213, 219,
 259, 261, 262
 Prilezaev, S. S. 77, 247
 Pringsheim, P. 59, 246, 254
 Pupke, H. 242, 264
 Puzeiko, E. K. 125, 134, 163, 260
 Puzeiko, K. 124, 259
 Raithel, K. 111, 126, 258, 260, 267
 Rajchman, J. A. 159, 261
 Rajewsky, W. 238, 247, 263
 Ralph, P. 46, 253
 Ramberg, E. G. 251
 Ramm, C. A. 242, 264
 Randmer, J. 94, 257
 Rankine 211
 Recknagel, E. 159, 261
 Reeb, O. 200, 262
 Reger, K. 49, 253
 Reggiani, M. 3, 252
 Reichel, W. 162, 261
 Reimann, A. L. 86, 256
 Reimert, L. J. 49, 253
 Reiß, K. H. 243, 264
 Reithmüller, C. 242, 264
 Rendus, H. 76, 255
 Rentschler, H. C. 49, 57, 253, 254
 Richardson, O. W. 19, 32, 33, 40, 66,
 82, 84, 85, 246, 252
 Richter, H. 250
 Rideout, V. C. 269

Riehl, N. 4, 13, 26, 252
 Ries, Ch. 251
 Ritchie, D. 250
 Rittner, E. S. 109, 258
 Rivein, R. S. 223, 263
 Rodda, S. 159, 261
 Roehr, W. W. 49, 253
 Roggendorf, A. 223, 263
 Roich, J. L. 270
 Roller, D. 56, 254
 Rompe, R. 4, 26, 116, 252
 Rose, A. 267
 Rose, F. 126, 260
 Rothe, H. 34, 252
 Rother, F. 45, 117, 253, 259
 Ruedy, J. E. 92, 257
 Ruhmer, E. 175, 251
 Ruhmkorff 270
 Rupp, E. 67, 255
 Rutherford 241
 Ruxford, W. S. 223, 263
 Rytz, A. 244, 264
 Rywkin, S. M. 104, 115, 194, 217, 226,
 257, 258, 260, 262, 267
 Sabine 245
 Saizeff, N. 75, 255
 Salow, G. 91, 257
 Salow, H. 266
 Salzberg, B. 159, 261
 Sandström, A. E. 124, 203, 259, 262
 Sanner, H. G. 125, 259
 Sayama, Y. 63, 65, 67, 254, 255, 265
 Schaefti, N. 70, 73, 255
 Schaffernicht, W. 115, 258
 Schallamach, A. 48, 55, 253, 254
 Schaper, J. 106, 257
 Scherrer, P. 137, 260
 Schlechtweg, H. 95, 252
 Schluge, H. 227, 263
 Schmidt, A. 125, 259
 Schmidt, H. 126, 260
 Schnitger, H. 94, 159, 257, 261
 Schnitger, S. 168, 261

Schöler, K. 71, 255
 Schön, W. 4, 13, 26, 252
 Schönwald, B. 103, 226, 257, 263, 271
 Schottky, W. 14, 15, 16, 17, 24, 30,
 117, 185, 229, 233, 247, 252, 259,
 263
 Schrödinger, R. 1, 252
 Schröter 176, 246
 Schulze, R. 46, 51, 231, 253, 263
 Schumann 30
 Schwarz, E. 112, 258
 Schwegler, R. 49, 253
 Schweickert, H. 124, 259
 Seitz, F. 4, 252
 Seki, T. 188, 261
 Sewig, R. 110, 197, 251, 257, 262
 Shaffer, L. H. 53, 254
 Shea, T. E. 69, 255
 Shive, J. N. 137, 260
 Shukov, W. W. 75, 255
 Siegert, A. J. F. 115, 259, 267
 Siemens 175, 245
 Simon, H. 159, 251, 261
 Simpson, O. 111, 114, 258
 Sinitzkaia, I. G. 67, 255
 Sixtus, K. 91, 256
 Skellott, A. M. 223, 263
 Smekal, A. 4, 14, 252
 Smith 245
 Smoluchowski, R. 46, 253
 Snyder, R. L. 159, 261
 Sommer, A. 75, 114, 251, 255, 269
 Sommerfeld 8, 20, 45
 Sosnowski, L. 111, 114, 258
 Spatz, W. D. B. 269
 Specht, P. 197, 260
 Spenke, E. 126, 230, 260, 263
 Stahl, H. 90, 256
 Starke 246
 Starkiewicz, J. 111, 114, 258
 Stasiw, O. 101, 102, 135, 257
 Steinberg, D. S. 138, 260
 Steudel, B. 159
 Steyskal, H. 159, 194, 261, 262
 Ulin, B. P. 109, 258
 Underwood, N. 46
 Uyeda, R. 67, 255
 Verwey, E. J. W. 61, 254
 Vink, H. J. 265
 Visvanathan, K. S. 266

Wagener, S. 86, 256
 Wagner 14
 Wagner, E. R. 88, 256
 Wagner, S. 90, 256
 Walker, R. C. 251
 Warminsky, R. 26, 116, 252
 Watts, B. N. 111, 114, 217, 236, 258, 262
 Weber, A. H. 51, 253
 Weidert, F. 183, 261
 Weimer, P. K. 267
 Weiss 158, 247
 Weiss, G. 92, 159, 257, 261
 Weiss, K. 115, 259
 Wentzel, G. 1, 252
 Wesch, L. 177, 178, 261
 West, W. 116, 259
 Wiedmann, G. 47, 253

Wilkins, M. H. F. 115, 259
 Wilmann, H. 112, 258
 Wilson, E. D. 7, 13, 137, 251
 Winch, R. P. 215, 262
 Winckelmann, J. 250
 Winde, G. T. 200, 262
 Withmer, C. A. 265
 Wood 135, 177
 Wooldridge, D. E. 35, 56, 89, 216, 252, 254, 256, 262
 Young, L. A. 223, 263
 Zeiller, O. 238, 264
 Ziegler, W. T. 119, 259
 Ziel, A. van der 229, 263
 Zintl, R. 76, 255
 Zworikin, V. K. 92, 158, 159, 171, 247, 251, 257, 261

Ablöseakt, lichtelektrischer 1
 Ablöseakt, lichtelektrischer, experimentelle Erfassung 79
 Adsorptionsschichten 90, 94
 —, Austrittsarbeit und Mengenkonstante 84
 — für Kathoden, Herstellung 57
 Aktivatorterme 13
 Alkalihalogenide 6
 —, Absorptionsgrenzen 98
 Alkalihalogenidkristalle 97
 Alkalihydridmoleküle = U-Zentren 100
 Alkalimetalle 43
 Alkalimetallschichten, Herstellung 54
 Alkalioxydkathoden 63
 Alkalischichten, dünne, auf nichtleitender Unterlage 52
 Alkalizellen 139
 —, Alterung und Lebensdauer 205
 —, reversible Ermüdung 207
 Allochromatische Kristalle 102
 Alterung der Alkalizellen 205
 — der Sperrsichtzellen 212
 — der Vervielfacher 208
 — der Widerstandszellen 210
 Aluminium, lichtelektrischer Effekt 49
 Anlagerungsterme 13
 Anlaufstromgebiet, Emissionsstrom im — 33
 Anlaufstromkurven 34
 Anodenanordnung in technischen Zellen 141
 Antimonglanz 139
 Antimonschichten, Austrittsarbeit 51
 Argon für gasgefüllte Zellen 145
 Atom, Aufbau 5
 —, Energieschema 5
 Aufdampfschichten, dünne 89
 Auslösezähler 238
 Äußerer Feldeffekt 185
 Austauschkräfte, quantenmechanische 5
 Austrittsarbeit 15
 — bei Adsorptionsschichten 84
 —, Herabsetzung 17
 —, — durch Adsorption elektropositiver Metalle 83
 —, licht- und glühlektrisch gemessene 81
 — und Kristallorientierung 45
 — der Metalle 44
 — und Orientierung bei Kristallen 83
 — bei oxydierten Metalloberflächen 85
 — reiner Metalle 81
 — und Sekundäremissionskoeffizient von Metallen 89
 Austrittsenergie des Elektrons 7
 Bändermodell 7
 — und lichtelektrische Leitung 26
 Bändermodelle von Störhalbleitern 10
 Bänderschema, erweitertes 13
 Bändertheorie und Leitfähigkeit 7
 Becquerel-Effekt 2
 — Zellen 103
 Bedeckungsgrad und langwellige Grenze 54
 Belegungsfunktion 8, 9
 Beleuchtungsstärke, Komplinien bei Selensperrsichtzellen 200
 Berylliumzelle, Temperatur und spektrale Verteilung 48
 Bildkraft 15
 Bildkraftpotential 15
 Bildsondenrohre 69
 Bildspeicherrohre 32, 70
 Bildwandler 32, 69
 Blei, supraleitende Schichten 117
 Bleichromat-Zellen 115
 Bleiglanz mit Lichtwirkung 131, 132
 Bleiglanzdetektor 131
 Bleiglanzkristalle für Netzzellen 136

Bleiglanznutzellen, Aufbau und Herstellung 135
 —, Frequenzabhängigkeit 228
 —, spektrale Verteilung 136
 —, Temperaturabhängigkeit 220
 —, Verhalten 203
 — aus natürlichen Kristallen 135
 Bleiglanz-Lichtdetektor, spektrale Verteilung 138
 Bleiselenidkristalle, künstliche, für Zellen 137
 Bleiselenid-Zellen 114
 Bleisulfid für technische Widerstands-zellen 110
 —, vakuumsublimiertes, Herstellung 113
 Bleisulfidkristalle, künstliche, für Zellen 137
 Bleisulfid-Sperrsichtzellen 129
 Bleisulfidwiderstandszenllen 177
 Bleisulfidzellen, Herstellung 110
 —, spektrale Verteilung 112
 Bleitellurid-Zellen 114
 Braggsche Reflexionsbedingungen 6
 Cadmium, entgastes, lichtelektrischer Effekt 49
 Cadmiumselenid-Zellen 115
 Cadmiumsulfid-Einkristalle 26
 Cadmiumsulfidkristalle als Zähler 115
 Cadmiumsulfid-Zellen 115
 Cadmiumtellurid-Zellen 115
 Cadmiumzellen, spektrale Verteilung 47
 Cäsium auf Silber 71
 Cäsium-Kathoden 60
 Cäsiumoxyd- und Legierungsschichten, Kombination 77
 Cäsiumoxydkathoden mit Ag-Unter-lage 61
 —, Herstellung 68
 —, durchsichtige 69
 —, Sekundäremission 91
 —, thermische Emission 66
 Compton-Effekt 79

Dämpfe 4
 Defektelektronen 31
 Defekthalbleiter 10
 Dielektrizitätskonstante eines pho- phoreszierenden Dielektrikums, Änderung mit der Belichtung 177
 Dipolschichten 18
 Dispersion 1
 D.K.-Effekt 177
 Doppelschicht 10
 Doppelschichtzellen, spektrale Ver-teilung 78
 Drahtwiderstandszenllen 175
 Drahtzellen 175
 Dunkelleitfähigkeit 24
 Dunkelwiderstände 174
 Effekte, lichtelektrische 1
 Eigenhalbleiter und Störhalbleiter 9
 — nach Wilson 7
 Eingabelung zur Bestimmung der langwelligen Grenze 39
 Einkathodenvervielfacher 166
 Elektrodenanordnung in technischen Zellen 141
 Elektrodengestaltung 174
 Elektrolyse zur Herstellung von Schichten 53
 Elektron, lichtelektrisch abgelöst 2
 Elektronenbeugung 67
 Elektronenersatzleitung 10
 Elektronenhülle, Aufbau 4
 Elektronenleiter 12
 Elektronenmikroskopie 83
 Elektronenoptische Untersuchungs-methoden 67
 Elektronenüberschußleitung 10
 Emission, s. Lichtelektrische Emission
 Emission, thermische, der Cäsium-oxydkathoden 66
 Emissionserscheinungen 32
 Emissionskonstante reiner Metalle 81
 Emissionsstrom 33
 — im Anlaufstromgebiet 33

Emissionsstrom im Raumlochgebiet 33
 Empfindlichkeit zusammengesetzter Kathoden 73
 Empfindlichkeitswert, Einfluß der Farbtemperatur auf — 143
 Energiebänder, Entstehung 5
 Energiegleichung 19
 Ermüdung, klassische, der Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt 204
 —, reversible, der Alkalizellen 207
 —, —, der Sperrsichtzellen 213
 —, —, der Widerstandszenllen 210
 — der Vervielfacher 208
 Ermüdungserscheinungen 65
 Ersatzhalbleiter 10
 Falling-off-Effekt 43
 Farbtemperatur, Einfluß auf Emp-findlichkeitswert 143
 Farbzentrums 99
 Fehlordnung 14
 Feldeffekt, äußerer 185
 —, innerer 186
 Feldemission 36
 — und Kathodenform 94
 Fester Körper 4
 —, Energieschema 6
 Flackereffekt 229
 Fowlersche Gleichung, Bestimmung der langwelligen Grenze aus der — 40
 — Gleichungen 20
 — Kurve 41
 Fremdmetalleinlagerung 65
 Frequenzabhängigkeit der Bleiglanz-nutzellen 228
 — der gasgefüllten Zellen 222
 — der Sperrsichtzellen 226
 — der Vakuumzellen 221
 — der Vervielfacher 224
 — der Widerstandszenllen 224
 — der Zellen 220
 Frequenzcharakteristiken gasgefüllter Zellen 223
 Gase 4
 —, Einfluß auf lichtelektrischen Effekt bei Cd 49
 Gasgefüllte Zelle mit thermischer Ka-thode 145
 — Zellen 141
 Gaszellen, Verhalten bezüglich Pro-porionalität 181
 Geiger-Müller-Zählrohr 238
 Germanium für Zellen 137
 Gesamtdunkelleitfähigkeit 24
 Gesamtemission zur Bestimmung der langwelligen Grenze 40
 Gitterleerstellen 11
 Glas als Schichtenträger 51
 Gleichrichter für hohe Spannungen 50
 Gleichrichtereffekt 28
 Gleichrichtermechanismus 28
 Gleichrichterwirkung 29
 Glimmspannung und Belichtung der Zelle 192
 Glühelektrische Emission 32
 — Messungen zur Bestimmung der langwelligen Grenze 40
 Glühelektronen 33
 Glühemission 81
 Glühkathoden, Anwendungsbiete 87
 Grenze, langwellige, und Bedeckungs-grad 54
 —, —, Bestimmung 39
 Grenzen, langwellige, der Metalle 44
 — und Maxima, langwellige zusam-mengesetzter Cs-Kathoden 62
 Grenzniveau und -energie 8
 Gütezahl 181, 237

Haftstellen 14
 Halbleiter 7
 --, amphotere 12
 --, Leitfähigkeit im belichteten Zustand 194
 --, lichtelektrischer Effekt an -- 2
 --, Sekundärströme 24
 Halbleiter-Metall-Kombination 28
 Halbleiterschicht aus Phosphoren 130
 Halbleiterschichten, hochohmige 113
 Halleffekt 10
 Hinterwandzellen, Cu_2O - 118
 Hochtemperatoreffekt 15
 Hull-Zellen 143
 Idiochromatische Kristalle 102
 Innengenügsung 49
 Innerer Feldeffekt 186
 Ionenleiter 14
 Ionisationsenergie des Atoms 7
 Isolator 7
 Isolatoren, lichtelektrischer Effekt an -- 2
 Kalium auf Pt-Mohr, normaler Photoeffekt 55
 -- auf Silber, spektrale Verteilung 56
 Kaliumhydridkathoden 59
 Kaliumhydridzentren 100
 Kammwiderstandszeile 176
 Kathoden mit Adsorptionsschichten, Herstellung 57
 --, dünne Schichten auf Metallen als -- 54
 --, durchsichtige 58
 --, Elektronenbilder 67
 --, KH- 59
 --, lichtelektrische, und Kathoden für Glüh-, Sekundär- und Feldemission, Vergleich 81
 --, zusammengesetzte 57, 68
 --, --, Empfindlichkeit und Quantenausbeute 73
 -- aus reinen Metallen 41

Kathodenanordnung in technischen Zellen 141
 Kathodenform und Feldemission 94
 Kemlinien lichtelektrischer Zellen 181
 Kobalt, Austrittsarbeit 45
 Kondensatorwiderstandszeilen 175
 Konstanze der Zellen 204
 Kontaktpotential 17
 Kristall, isolierender 22
 Kristalle, Austrittsarbeit und Orientierung 83
 --, gestörte 98
 --, natürliche, für Lichtdetektoren 131
 --, natürliche und künstliche, für Zellen 131
 --, künstliche, für Zellen 137
 -- mit Halogenüberschüß und Fremdbeimengungen 100
 Kristallorientierung und Austrittsarbeit 45
 Kristallphotoeffekt 2
 Kugelnetzvervielfacher 163
 Kupfer, Austrittsarbeit 45
 Kupferoxydul, allo- und idiochromatische Kristalle 102
 --, Herstellung 119
 --, lichtelektrische Verhältnisse 103
 --, spektrale Verteilung 103
 --, Hinter- und Vorderwandzellen 118
 --, spektrale Verteilung 120
 Ladungsdichte, elektrische 1
 Lebensdauer der Alkalizellen 205
 -- der Sperrsichtzellen 212
 -- der Widerstandszeilen 210
 -- der Zellen 204
 Legierungen, Sekundäremission 92
 Legierungskathoden 71
 --, Aufbau 75
 --, Einfluß von O_2 75
 --, Herstellung 76
 --, Quantenausbeuten 75
 Legierungs- und Cäsiumoxydschichten, Kombination 77

Leitertypen 8
 Leitfähigkeit und Bändertheorie 7
 --, metallische 7, 8
 --, spezifische 12
 Leitfähigkeitsband 7
 Leitung, s. Lichtelektrische -- 26
 Leitungselektron 2
 Lenard-Fenster bei Zählrohren 243
 Lichtdetektoren, Aufbau 131
 --, Verhalten 209
 -- aus natürlichen Kristallen 131
 Lichtelektrische Emission, Richardsonsche Gleichung 19
 -- Gerade, Bestimmung der langwelligen Grenze aus -- 39
 -- Leitung und Bändermodell 26
 -- Zellen, s. Zellen
 Lichtelektrischer Ablöseakt, experimentelle Erfassung 79
 -- und lichtelektrische Effekte 1
 -- Effekt, äußerer, Grundlagen 18
 --, -- und innerer 2
 --, Allgemeines 4
 --, geschichtliche Angaben 245
 --, innerer, Aufbau und Herstellung von Zellen nach -- 97
 --, --, Grundlagen 22
 Lichtelektrische Effekte, Literaturangaben 250
 Lichtelektrischer Primärstrom 22
 Lichtintensität und Photostrom 18, 27
 Lichtquantenzähler 4, 238
 Lichtwelle, Einfluß auf Atome 1
 Lichtzähler 238
 Lithiumoxydkathoden 64
 Malter-Effekt 95
 Mangelhalbleiter 110
 Marx-Effekt 43
 Maxima, kurzwellige 64
 Mengenkonstante bei Adsorptionsschichten 84
 -- bei oxydierten Metalloberflächen 85
 Meßausbeute 23
 Meßzellen 140
 Metalle, Austrittsarbeit und Sekundäremissionskoeffizient 89
 --, elektropositive, Herabsetzung der Austrittsarbeit durch Adsorption 83
 --, kompakte, Sekundäremission 88
 --, langwellige Grenzen und Austrittsarbeit 44
 --, reine, Emissionskonstante u. Austrittsarbeit 81
 --, --, als Kathodenmaterial 41
 --, --, Richardsonsche Geraden 82
 Metallkathoden 41
 --, Dicke 42
 --, Herstellung 53
 Metalloberflächen, oxydierte, Austrittsarbeit u. Mengenkonstante 85
 Molybdänit 133
 Multiplier 157
 Nachweigrenze, obere und untere 228
 -- der Zellen 228
 Natriumoxydkathoden 64
 Netzanoden 143
 Netzvervielfacher 77, 161
 Niob, N-Verbindungen 117
 Nulleffekt bei Lichtzählern 241
 Oberflächenphotoeffekt 42
 Oxydkathoden 85
 Pauli-Prinzip 5
 Pendelvervielfacher mit longitudinalen Magnetfeld 165
 Phosphor 100
 Phosphore als Halbleiterschicht 130
 Photoeffekt, normaler und selektiver 38, 55
 -- selektiver 52
 Photoelement 2, 27, 178
 Photoelemente, Verhalten 199
 Photo-EMK 2, 123
 Photographischer Effekt und lichtelektrischer 100
 Photometric, astronomische 140

Photospaltung 27
 Photostrom, Abhängigkeit vom auffallenden Lichtstrom 182
 — und Lichtintensität 18, 27
 Photostromgleichung 73
 Photozelle 18
 Photozellen mit einstufiger Verstärkung 159
 —, Herstellerfirmen 178
 —, handelsübliche Ausführungsformen 149
 —, technische 139
 —, —, Überblick (T) 146
 — mit zentraler Anode 142
 Photozellenflächen, mosaikartige 70
 Polarisationsspannung 14
 Polyäthyl 133
 Primärstrom, s. Lichtelektrischer Primärstrom
 Proportionalitätszähler 238
 Proteine, farbige, Widerstand und Beleuchtung 116
 Quantenequivalent 22
 Quantenausbeute 24
 — zusammengesetzter Kathoden 73
 Quantenbeziehung 1, 2, 19, 22
 Quarz als Schichtträger 51
 Radio frequency type multiplier 165
 Randeffekt 30
 Raumladengebiet, Emissionsstrom im 33
 Rauschen der Zellen 174
 Rauschstrom 229
 Rauschverhältnisse gasgefüllter Zellen
 — der Sperrsichtzellen 236 [231]
 — der Vakuumzellen 228
 — der Vervielfacher 232
 — der Widerstandszellen 234
 Richardsonsche Geraden reiner Metalle 82
 Richardsonsche Gleichung für Glühemission 32
 — für lichtelektrische Emission 19

Sättigungsstrom 33
 Sekundärelektronen, Energieverteilung 35
 Sauerstoff zur Sensibilisierung 60
 Schichten, dünne, lichtelektrische Eigenschaften 50
 —, —, auf Metallen als Kathoden 54
 —, freischwebende 51
 —, supraleitende dünne 117
 Schottky-Effekt 17, 185
 Schrödinger-Gleichung, zeitabhängig 1
 Schroteffekt 229
 Schwermetalle 43
 Sekundäremission 34
 — von Cäsiumoxydkathoden 91
 — kompakter Metalle 88
 — von Legierungen 92
 — bei schräg einfallendem Primärstrahl 90
 — von Verbindungen 93
 Sekundäremissionsfaktor 36
 Sekundäremissionskoeffizient von Metallen 89
 Sekundärströme 24
 Selen 105
 —, Modifikationen 105
 —, Strom-Spannungskurve 196
 Selensperrsichtzellen, Aufbau und Herstellung 121
 —, Frequenzabhängigkeit 226
 —, spektrale Verteilung 122
 —, Verhalten 200
 Selen-Tellur 107
 Selen-Tellur-Zellen, Herstellung 108
 —, spektrale Verteilung 108
 Selenwiderstandszellen 197
 —, Anwendungsbereich 105
 —, Herstellung 105
 —, spektrale Verteilung 107
 Selenzellen, Frequenzabhängigkeit 225
 —, Temperaturabhängigkeit 216
 Silber, Austrittsarbeit 45
 Silberbromidemulsionen 116
 Silberhalogenidkristalle 100

Silbersulfid-Sperrsichtzellen 128
 Siliziumkarbid für Zellen 137
 Spektrale Verteilung und langwellige Grenze 38
 Spektrale Verteilung, s. Verteilung
 —, zeitliche Veränderung 206
 Spektrallinie, Hyperfeinstruktur 79
 Sperrsicht 28
 —, chemische 28
 —, —, Wesen 123
 —, physikalische 30
 Sperrsichtphotonen, Grundlagen
 Sperrsichtzelle 2, 178 [27]
 Sperrsichtzellen, Alterung und Lebensdauer 212
 —, Aufbau und Herstellung 118
 —, Frequenzabhängigkeit 226
 —, Größe und Form 179
 —, Lieferfirmen 179
 —, Rauschverhältnisse 236
 —, reversible Ermüdung 213
 —, Temperaturabhängigkeit 218, 219
 —, Verhalten 199
 — und Widerstandszellen 125
 Spezialzellen 144
 Spitzenzähler 238, 241
 Störhalbleiter und Eigenhalbleiter 9
 —, Einteilung 10
 Störstellen 11
 Stoletowsches Maximum 190 [178]
 Stromabnahme bei Sperrsichtzellen
 Strom-Spannungscharakteristiken
 — gasgefüllter Zellen 189
 — der Vakuumzellen mit Wechselspannung 187
 Strom-Spannungskennlinien der Vakuumzellen 184
 Supraleitende dünne Schichten 117
 Temperaturabhängigkeit der Bleiglanznetzzellen 220
 — der Sperrsichtzellen 218
 — der Vervielfacher 215
 — der Widerstandszellen 216
 Temperaturabhängigkeit der Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt 214
 Temperatureinfluß auf integrale Empfindlichkeit 48
 Thalliumsulfid, Herstellung 109
 — Sperrsichtzellen, Aufbau und Herstellung 127
 —, —, Elektronenfluß und spektrale Verteilung 128
 — Widerstandszellen 126, 197
 Thalliumsulfidzellen, Frequenzabhängigkeit 227
 —, spektrale Verteilung 110
 Thalliumzellen, Frequenzabhängigkeit 225
 —, spektrale Verteilung 47
 Tieftemperatoreffekt 15
 Titanzellen, spektrale Verteilung 47
 Tonfilmzellen 139, 140
 Trockengleichrichter 28
 Tunneleffekt, wellenmechanischer 28
 U-Zentren 100
 Überschußhalbleiter 10
 Ultrarotzellen, Temperaturabhängigkeit 217
 Ultravioletbelichtung und Funkenausbruch 49
 Ultravioletzellen 47
 Unschärfe, stöchiometrische 11
 Vakuumzellen, Frequenzabhängigkeit
 —, Rauschverhältnisse 228 [221]
 —, Stromspannungskennlinien 184
 —, Verhalten bezüglich Proportionalität 181
 — mit Wechselspannung, Strom-Spannungscharakteristiken 187
 Verbindungen, Sekundäremission 93
 Verdampfung, thermische, zur Herstellung von Schichten 53
 Verstärkerröhren 145
 Verstärkungsfaktor 26

- Verteilung, spektrale, zur Bestimmung der langwelligen Grenze 39
- Verteilungskurve, spektrale 38
- Vervielfacher 157
 - , Alterung und Ermüdung 208
 - , axialsymmetrischer 167
 - , dynamische 165
 - , Einteilung 158
 - , Frequenzabhängigkeit 224
 - , L- und T- 160
 - , Netz- 161
 - , Rauschverhältnisse 232
 - , statische, Berechnung 168, 170
 - , technische, Überblick (T) 173
 - , Temperaturabhängigkeit 215
 - , Verhalten bezüglich Proportionalität 193
 - , Wirkungsweise 157
 - , mit elektrostatisch bündelnden Elektroden 163
 - , mit magnetischem Querfeld 164
- Vervielfachung, Abhängigkeit von Gesamtspannung und Stufenzahl 171
- Volumenphotoeffekt 42
- Vorderwandzellen, Cu₂O- 118
- Widerstand, spezifischer 13
- Widerstandszellen 172
 - , Alterung und Lebensdauer 210
 - , Frequenzabhängigkeit 224
 - , Rauschverhältnisse 234
 - , reversible Ermüdung 210
 - , technische, Verwendung von Bleisulfid 110
 - , Temperaturabhängigkeit 216
 - , Verhalten 195
 - , und Sperrsichtzellen 125
- Zähler, Ausbeute 243
- Zählrohr, Geiger-Müller- 238
- Zählrohrcharakteristik 240
- Zählrohre 238
- Zellen mit äußerem lichtelektrischen Effekt 139
 - , -, klassische Ermüdung 204
 - , -, Temperaturabhängigkeit 214
 - , Aufbau und Herstellung nach äußerem lichtelektrischen Effekt 38
 - , Aufbau und Herstellung nach dem inneren lichtelektrischen Effekt 97
 - , Eigenschaften 181
 - , Empfindlichkeiten (T) 249
 - , Frequenzabhängigkeit 220
 - , gäsgefüllte 141
 - , -, Frequenzabhängigkeit 222
 - , -, Rauschverhältnisse 231
 - , -, Strom-Spannungsscharakteristiken 189
 - , -, mit thermischer Kathode 145
 - , geritzte oder gravierte 176
 - , Konnlinien 181
 - , Nachweisgrenze 228
 - , rotempfindliche 114
 - , Sensibilisierung durch Sauerstoff 60
 - , Spezial- 144
 - , technische Ausführungsformen 139
 - , technische, spektrale Verteilungen 47 [114]
 - , -, mit verschiedenen Substanzen
 - , mit innerem lichtelektrischen Effekt 172
 - , aus künstlichen Kristallen 137
 - , für Längs- und Querfeldbeleuchtung 172
 - , aus natürlichen und künstlichen Kristallen 131
 - , s. auch Photozellen
- Zellendaten, Zusammenfassung 237
- Zellenempfindlichkeit 148
- Zink, Austrittsarbeit 45 [195]
- Zinkblende, Strom-Spannungskurve
- Zinn, supraleitende Schichten 117
- Zwischengitterplätze 14